



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MODUL ŘÍZENÍ LOKOMOTIVY

LOCOMOTIVE CONTROL MODULE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Šrámek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Baštán

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Jiří Šrámek

**ID:** 195446

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Modul řízení lokomotivy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je navržení a realizace řídicího modulu modelu lokomotivy pro demonstrátor firmy STARMON. Lokomotiva s řízením bude sloužit pro demonstraci nových technologií zabezpečovacího zařízení pro železniční provoz vyvíjené touto firmou.

1. Seznamte se s technologiemi pro zabezpečení železničního provozu vyvíjenými firmou STARMON a vytvořte rešerši, která je popisuje.
2. Popište demonstrátor společnosti STARMON.
3. Definujte požadavky na hardware pro řídicí modul v souladu s požadavky zadavatele.
4. Navrhněte elektrické schéma řídicího modulu.
5. Navrhněte a realizujte desku plošných spojů řídicího modulu.
6. Navrhněte a popište strukturu firmware a komunikačních protokolů.
7. Implementujte firmware.
8. Otestujte funkčnost celého zařízení a zhodnotte dosažené výsledky.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Interní dokumentace společnosti STARMON.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 20.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Baštán

**Konzultant:** Ing. Jiří Holinger

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí řídicího modulu pro model lokomotivy na demonstrátor vlakových zabezpečovacích zařízení firmy STARMON. Detailně se zabývá návrhem zapojení, firmware modulu a struktury komunikačního protokolu. Dále popisuje identifikaci lokomotivy jako regulované soustavy a návrh regulátoru rychlosti včetně rychlostních ramp. Konec práce popisuje uživatelské prostředí a strukturu kódu ovládacích aplikací, které jsou dostupné pro počítač a pro mobilní systém Android.

## **Klíčová slova**

Lokomotiva, železnice, zabezpečovací zařízení. návrh hardware, regulace, PSD regulátor, ovládací program, embedded systém

## **Abstract**

The thesis deals with development of control module for a train model for STARMON's demonstrator of train safety systems. It fully describes the connection design of diagrams, structure of firmware and solution of the communication protocol. It deals also with system identification and regulator design, including speed ramps. The end of this thesis describes user interface and structure of control applications, which are available for PC and Android.

## **Keywords**

Locomotive, railway, safety system, hardware design, control, PSD controller, remote control application. embedded system

## **Bibliografická citace**

ŠRÁMEK, Jiří. Modul řízení lokomotivy [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-19].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119324>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Ondřej Baštán.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Modul řízení lokomotivy“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

V Brně dne: 20. května 2019

.....

(podpis autora)

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu střediska elektroniky firmy STARMON, Ing. Jiřímu Holingerovi a kolegům za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a vedoucímu práce Ing. Ondřeji Baštánovi za vedení práce a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 20. května 2019

.....

(podpis autora)

# Obsah

1	ÚVOD .....	1
2	Vlaková zabezpečovací technika .....	2
2.1	Hlavní části zabezpečovacích zařízení.....	2
2.1.1	Balíza.....	2
2.1.2	Počítač náprav.....	2
2.1.3	Kolejové obvody .....	3
2.1.4	Další komponenty zabezpečovacích zařízení.....	3
2.2	Zabezpečovací technika firmy STARMON .....	3
2.2.1	Počítač náprav PNS-03.....	4
3	ETCS.....	7
3.1	Vztah ETCS a demonstrátoru .....	7
3.2	Hlavní úrovně ETCS .....	7
3.2.1	ETCS L0 .....	7
3.2.2	ETCS L1 .....	7
3.2.3	ETCS L2 .....	8
3.2.4	ETCS L3 .....	8
4	Demonstrátor .....	10
4.1	Trat' a napojení zabezpečovacích zařízení.....	10
4.2	Model lokomotivy .....	11
4.3	Požadavky na nový HW modelu .....	12
5	Koncept hardware.....	13
6	Návrh hardware .....	15
6.1	Mikrokontrolér a řízení.....	17
6.2	Řízení motorů.....	20
6.3	Bezdrátové připojení Wi-Fi.....	22
6.4	Komunikace pomocí IR.....	23
6.5	Odometrie .....	24
6.6	Zvukové efekty a uložení zvuků .....	26
6.7	Rozšiřující konektory, posílené výstupy.....	27
6.8	Hlavní napájecí obvody .....	28
6.9	Záložní napájecí obvody.....	29
7	Návrh firmware .....	30
7.1	Obsluha regulátorů .....	30
7.2	Detekce příkazů z WiFi.....	30
7.2.1	Komunikační protokol .....	30
7.3	Měření rychlosti a výpočet ujeté vzdálenosti .....	32
7.3.1	Nastavení hardwarového časovače.....	32

7.3.2	Problémy při měření.....	33
7.4	Měření napětí zdrojů.....	33
8	Návrh a výsledky regulace .....	34
8.1	Identifikace soustavy.....	34
8.1.1	Strejcova metoda.....	34
8.1.2	Metoda nejmenších čtverců .....	35
8.2	Návrh regulátoru rychlosti .....	37
8.3	Regulace ujeté dráhy a rychlostní rampy.....	39
8.4	Výsledné průběhy.....	40
9	Ovládací software pro PC.....	42
10	Mobilní aplikace.....	45
11	Závěr .....	47
	Literatura .....	49
	Seznam příloh.....	52



# Seznam symbolů a zkratek

ARM	- Advanced RISC Machines
AT	- Attention (začátek zprávy AT příkazu)
CS	- Chip select (pin pro výběr integrovaného obvodu na sériové komunikační lince)
DC	- Stejnoseměrný proud
ETCS	- European Train Control System (Evropský vlakový zabezpečovač)
FEKT	- Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
FLASH	- Typ nonvolatilní paměti
FPU	- Floating point unit (jednotka pro práci s čísly s plovoucí čárkou)
FreeRTOS	- Free Real-Time Operating System (operační systém pro MCU)
GPIO	- General purpose input/output (jednotka univerzálních vstupů/výstupů)
GSM-R	- Rádiová síť GSM pro použití na železnici
I/O	- Input/output (vstupy a výstupy)
I2C	- Inter-IC (rozhraní pro komunikaci mezi IC)
IC	- Integrated circuit (integrovaný obvod)
IR	- Infra-red (infračervené např. záření)
LED	- Light emitting diode (světlo emitující dioda)
Li-Ion	- Lithium-Ion (typ akumulátoru)
Li-Pol	- Lithium-Polymer (typ akumulátoru)
MCU	- Microcontroller Unit (mikrokontrolér)
MSPS	- Mega samples per second (milionů vzorků za vteřinu)
NEC	- Firma, nyní Renesas
Nf	- Nízkofrekvenční, nízké frekvence
PC	- Personal computer (osobní počítač)
PLL	- Phase-locked loop (fázový závěs)
PID	- Proporcionálně integračně derivační (regulátor)
PSD	- Proporcionálně sumačně diferenční (regulátor)
PWM	- Phase width modulation (pulzně šířková modulace)
QSPI	- Quad SPI (rozhraní SPI používající 4 datové vodiče)
RISC	- Reduced Instruction Set Computer (redukovaná instrukční sada)
RTOS	- Operační systém reálného času
SIRIUS	- STARMON Innovative Railway Interlocking Universal Solution
SPI	- Serial peripheral interface (rozhraní pro komunikaci mezi IC)
STARMON	- Společnost vyvíjející, mimo jiné, zabezpečovací zařízení pro vlakovou dopravu
STARMos	- STARMON ARM OS („operační systém“ pro ARM mikrokontroléry)

TCP/IP - Transmission Control Protocol / Internet Protocol  
UART - Universal asynchronous receiver / transmitter  
VUT - Vysoké učení technické  
WiFi - Wireless Fidelity (bezdrátová technologie)

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Eurobalíza [5] .....	2
Obrázek 2: Dvousystémový snímač RSR180 [10] .....	4
Obrázek 3: Časový diagram korektního ovlivnění počítacího bodu [6].....	5
Obrázek 4: Blokové schéma PNS-03 [6] .....	5
Obrázek 5: PNS-03 v reálném provozu [10] .....	6
Obrázek 6: ETCS úrovně 1 [3] .....	8
Obrázek 7: ETCS úrovně 2 [3] .....	8
Obrázek 8: ETCS úrovně 3 [3] .....	9
Obrázek 9: Kolej na demonstrátoru .....	10
Obrázek 10: Lokomotiva s tendrem pro elektroniku na testovacím kolejišti .....	11
Obrázek 11: Tendr s původní řídicí elektronikou .....	11
Obrázek 12: Blokové schéma řídicí elektroniky .....	12
Obrázek 13: Jednoduché řízení DC motoru [12] .....	13
Obrázek 14: můstkový spínací obvod pro DC motor [12] .....	14
Obrázek 15: Horní strana navržené hlavní DPS .....	16
Obrázek 16: Spodní strana navržené hlavní DPS.....	16
Obrázek 17: Navržené DPS přijímačů z IR balíz.....	17
Obrázek 18: Zapojení mikrokontroléru a pomocných obvodů .....	18
Obrázek 19: Blokové schéma mikrokontroléru řady STM32F4xx [15] .....	19
Obrázek 20: Blokové schéma budiče motorů MAX14870 [17] .....	20
Obrázek 21: Zapojení budičů motorů a měření proudu.....	21
Obrázek 22: Blokové schéma monitoru napětí a proudu INA219 [19].....	22
Obrázek 23: WiFi modul EPS8266 – model ESP-07 [20].....	22
Obrázek 24: Zapojení WiFi modulu a pomocné obvody .....	23
Obrázek 25: Zapojení infračervených přijímačů.....	24
Obrázek 26: Umístění enkodéru a enkodérový disk .....	25
Obrázek 27: Optočleny pro odometrii .....	25
Obrázek 28: Audio zesilovač s LM386 .....	26
Obrázek 29: Externí datová FLASH paměť .....	26
Obrázek 30: Hlavní rozšiřující konektor .....	27
Obrázek 31: Tranzistorově posílené výstupy .....	27
Obrázek 32: Hlavní napájecí obvody s usměrňovačem a stabilizací.....	28
Obrázek 33: Záložní napájení s nabíjecími obvody.....	29
Obrázek 34: Princip Strejcovy metody [27].....	34
Obrázek 35: Průběh rychlosti při jednotkovém skoku PWM a aproximace .....	35
Obrázek 36: Průběh proudu při jednotkovém skoku PWM.....	36
Obrázek 37: Průběh dráhy při jednotkovém skoku PWM.....	36

Obrázek 38: Odezva navrženého regulátoru na jednotkový skok požadované hodnoty .....	37
Obrázek 39: Odezva navrženého regulátoru na rampu požadované hodnoty .....	38
Obrázek 40: Průběh brzdné rampy .....	40
Obrázek 41: Průběh rychlosti modelu (1) .....	41
Obrázek 42: Průběh rychlosti modelu (2) .....	41
Obrázek 43: PC Aplikace – stránka s informacemi .....	42
Obrázek 44: PC Aplikace – nastavení regulátoru .....	43
Obrázek 45: PC Aplikace – vyobrazení grafu .....	43
Obrázek 46: PC Aplikace – zprávy .....	44
Obrázek 47: Android aplikace – ovládání .....	45
Obrázek 48: Android aplikace – informace .....	45
Obrázek 49: Android aplikace – automatické řízení .....	46
Obrázek 50: Android aplikace – zprávy .....	46

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam povelů .....	31
Tabulka 2: Informace v paketu telemetrie .....	32
Tabulka 3: Informace v paketu systémových informací .....	32

## Seznam vzorců

Rovnice 1: Základní rovnice motoru [11].....	14
Rovnice 2: Vztah momentu a proudu DC motorem [11].....	14
Rovnice 3: Výpočet nabíjecího proudu LTC4002.....	29
Rovnice 4: Výpočet rychlosti z enkodéru.....	33
Rovnice 5: Přenos soustavy n-tého řádu .....	35
Rovnice 6: Identifikovaný systém.....	35
Rovnice 7: Přenos navrženého PI regulátoru.....	37
Rovnice 8: Výpočet ujeté vzdálenosti.....	39
Rovnice 9: Výpočet aktuálně požadované rychlosti pro náběžnou rampu .....	39
Rovnice 10: Výpočet aktuálně požadované rychlosti pro sestupnou rampu.....	39
Rovnice 11: Výpočet času potřebného pro zastavení .....	39
Rovnice 12: Výpočet potřebné brzdné dráhy.....	39

# 1 ÚVOD

Cílem práce je navrhnout řídicí modul pro model lokomotivy, která je jednou z částí budoucího demonstrátoru zabezpečovacích zařízení společnosti STARMON. Modul nevykonává žádnou bezpečnostní funkci, ale svým pohybem po modelovém kolejišti generuje data pro předvádění zabezpečovacích systémů napojených na kolejiště. Celý koncept demonstrátoru je navržený tak, aby bylo možné připojit co největší množství zabezpečovacích a diagnostických zařízení firmy.

Jedním ze základních požadavků na vyvíjený model lokomotivy je možnost vzdáleného manuálního ovládání a automatického řízení po zadání maximální rychlosti a požadované délky dráhy, kterou má model ujet. Vzhledem k tomu, že bude model použit pro demonstraci před zákazníky, musí se zásahy do vzhledu lokomotivy omezit na minimum a většinu potřebného zapojení vestavět do tendru za lokomotivou.

V první části práce nejprve prozkoumám teorii, týkající se problematiky zabezpečovacích zařízení pro kolejovou dopravu, princip jejich funkce a jejich hlavní součásti. Následuje seznámení s Evropským traťovým zabezpečovačem (ETCS), jehož funkce se v budoucnu budou realizovat na demonstrátoru.

Po nutném průzkumu výše zmíněné teorie stanovím přesné požadavky na hardware a software zařízení. V následujících kapitolách popíšu návrh hardware modelu, jehož jádrem bude mikrokontrolér řady STM32. Postupně budou popsány také jednotlivé bloky schématu, od napájení, přes komunikaci po řízení motorů a odometrii.

Po návržení hardwaru, je možné začít specifikovat komunikační protokol a implementovat firmware modulu. Pro WiFi komunikaci bude navržen jednoduchý protokol založený na krátkých textových zprávách posílaných přes navázané TCP (Transmission Control Protocol) spojení. Firmware bude založen na volně dostupném operačním systému FreeRTOS (Free Real-Time Operating System), s použitím vláken, mezi kterými se rozdělí hlavní funkce modulu (přijímání povelů, regulace atd.). Tím bude zaručena možnost jednoduchého rozšíření firmware o nové funkce v budoucnu –přidáním vlákna realizujícího novou požadovanou funkci.

Dále bude popsán postup při identifikaci regulované soustavy, návrh regulátoru rychlosti a rozjezdových a brzdných rychlostních ramp. Identifikace soustavy bude provedena Strejcovou metodou nebo metodou nejmenších čtverců.

Následovat budou kapitoly popisující ovládací programy pro počítač a mobilní systém Android, včetně popisu uživatelského prostředí napsaných aplikací, jejich funkcí a struktury jejich kódu

## 2 VLAKOVÁ ZABEZPEČOVACÍ TECHNIKA

Zabezpečovací technologie pro železnici mají za úkol zvýšit bezpečnost provozu, kontrolou činnosti zaměstnanců nebo jejich úplným nahrazením při řízení kolejové dopravy. [2]

### 2.1 Hlavní části zabezpečovacích zařízení

Hlavními částmi zabezpečovacích zařízení v kolejišti jsou balízy, kolejové obvody a počítače náprav. V následujících kapitolách budou tyto prvky detailněji popsány. [3]

#### 2.1.1 Balíza

Název vychází z francouzského slova „balise“ označující maják. Jedná se o prvek, který se instaluje do kolejiště. Na lokomotivě je nainstalováno zařízení pro čtení balíz, které trvale vysílá signál o frekvenci 27MHz pro jejich napájení. Při přejetí balízy přijímá zpět datagramy na pásmech 3,9 a 4,5MHz, které v případě fixní balízy obsahují údaje o poloze balízy a v případě proměnné balízy stav kolejového úseku. Standardizovaná Eurobalíza je na obrázku 1. [4]



Obrázek 1: Eurobalíza [5]

#### 2.1.2 Počítač náprav

Počítač náprav je komplexní soustava zařízení, která má za úkol hlídat obsazenost kolejového úseku. Část v kolejích sestává ze dvou tzv. počítacích bodů, kterými se detekuje počet náprav a směr jejich jízdy. Podle počtu náprav v úseku se zjišťuje jeho obsazenost. [6]



### **2.1.3 Kolejové obvody**

Jedná se o zařízení, které detekuje kolejové vozidlo na kolejovém úseku. Zjednodušeně funguje na principu průchodu proudu přes nápravu kolejového vozidla. Detailní princip detekce je velmi složitý a přesahuje rámec této práce. Pro podrobnější informace viz [7]. [8]

### **2.1.4 Další komponenty zabezpečovacích zařízení**

Systém se skládá z řídicího modulu (průmyslové PC, PLC nebo embedded systém), modulů pro vstupy (běžné vstupy nebo proudová smyčka), modulů pro výstupy (běžné výstupy nebo bezpečné výstupy se zaručeným vypnutím), a různých specializovaných modulů. Mezi specializované moduly můžeme zařadit například oddělovače komunikačních linek, specializované routery a switche. [9]

## **2.2 Zabezpečovací technika firmy STARMON**

Celá tato kapitola vychází z informací dostupných z [9].

Protože řešení zabezpečovací zařízení STARMON K-2002 a PNS-03 jsou již více než 15 let staré, vznikají problémy s dostupností součástek - hlavně pamětí a procesorů, narůstají náklady na kabelizaci a výstavbu technologických prostor a zvyšují se nároky odběratelů na bezúdržbová zařízení. Z výše popsaných důvodů vznikla nová technologie zabezpečovacích zařízení s označením SIRIUS (STARMON Innovative Railway Interlocking Universal Solution).

Tato nově vyvíjená technologie firmy klade důraz na distribuované řešení, protože tak lze dosáhnout vyšší spolehlivosti (méně kabelů propojujících vstupy a výstupy s kazetami I/O a zálohované komunikační linky, páteřní optická linka) a nižší ceny než konkurence. Další z výhod plyne z využití moderních technologií – všechny moduly využívají mikrokontrolér firmy ST Microelectronics s jádrem ARM Cortex M – a to výhledově dostupnost součástek na výrobu a případné opravy, a hlavně jejich spotřeba elektrické energie. Napájení je rozděleno do dvou částí, vnitřní využívá bezpečné napětí 24V DC a venkovní 400V DC, díky čemuž je možné použít menší průřez kabelů.

Po stránce softwarové přišlo také vylepšení – oproti starému systému K-2002 využívá SIRIUS modulárního programování v jazyce C++. Všechny části jsou nejprve modelovány na PC, díky tomu je možné lépe testovat jednotlivé moduly programu a odhalit chyby, které by se mohly negativně projevit za běhu na reálném zařízení. Další omezení chyb spočívá ve vývoji v souladu s normou ČSN EN 50128, která stanovuje postupy a technické požadavky pro software do programovatelných zařízení v železničních a bezpečnostních aplikacích. Software pro všechny

bezpečnostně relevantní prvky je napsán na vlastním jednovláknovém operačním systému s názvem STARMos. [9]

Součástí vývoje jsou i konfigurační a projekční nástroje.

### 2.2.1 Počítač náprav PNS-03

Tato kapitola vychází z informací dostupných z [6].

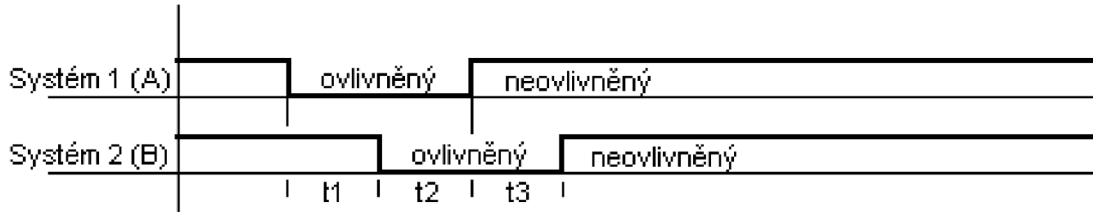
Počítač náprav PNS-03 je prostředek určený k detekci kolejových vozidel v kolejových úsecích. Na základě informace o počtu náprav v daném úseku je možné rozhodnout o jeho obsazenosti nebo neobsazenosti a podle toho rozsvítit odpovídající návěstidlo.

Každý úsek je ohraničen počítacími body, obvykle realizovanými dvousystémovým indukčním snímačem RSR180, viz obrázek 2. Takový snímač se instaluje na kolejnici a je díky němu možné detekovat nápravu kolejového vozidla a také směr jeho jízdy z posloupnosti obou signálů. [6]



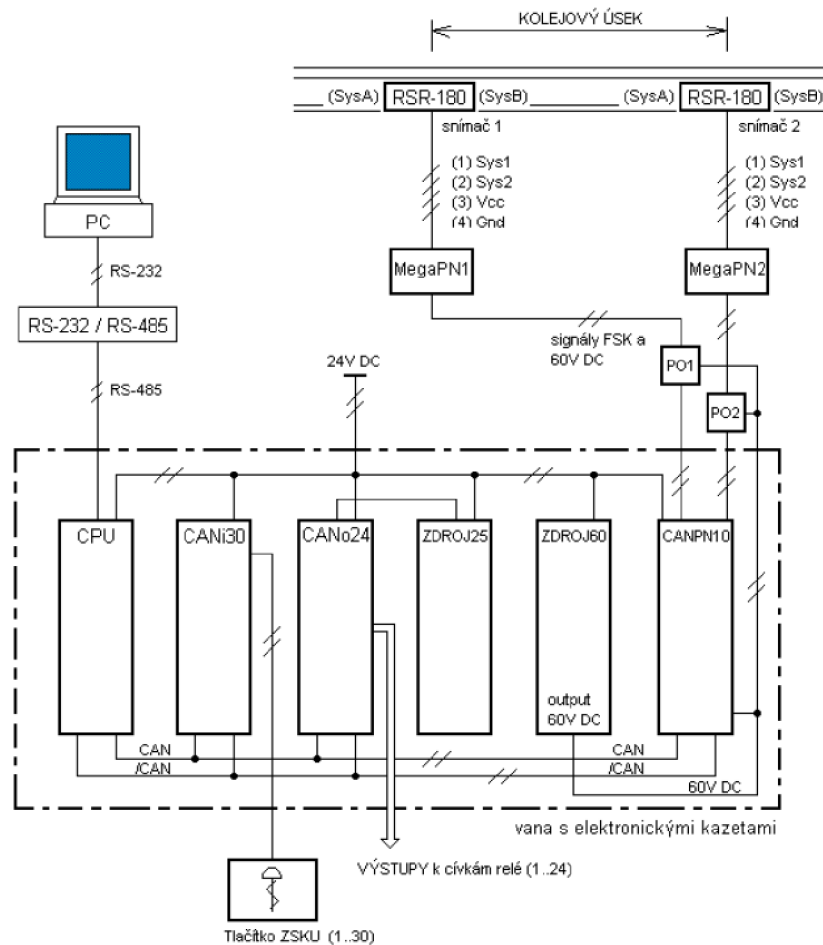
Obrázek 2: Dvousystémový snímač RSR180 [10]

Pro korektní detekci nápravy musí mezi aktivací obou systémů uplynout daný čas ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ), viz obrázek 3. Pokud jsou tyto časy kratší než minimální stanovené, vyhodnotí se tzv. nekorektní přejetí a z bezpečnostních důvodů se obsadí přilehlé kolejové úseky.



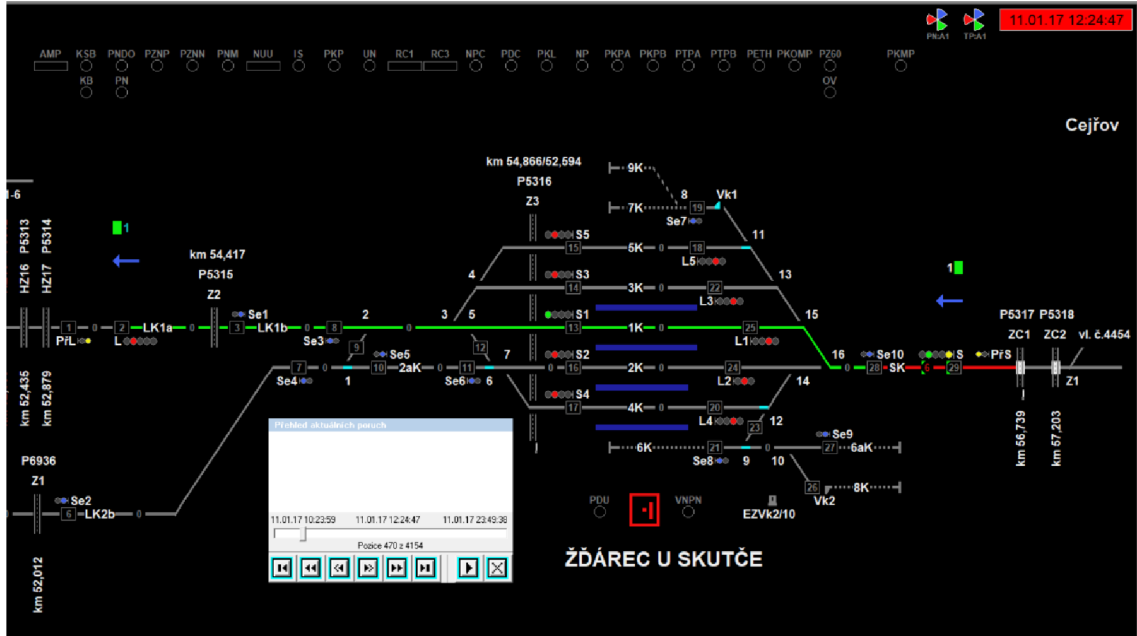
**Obrázek 3: Časový diagram korektního ovlivnění počítačícího bodu [6]**

Celý systém PNS-03 sestává z kombinace několika kazet, zajišťujících napájení, vstupy, výstupy a komunikaci s venkovním systémem, který čte oba snímače. Viz obrázek 4.



**Obrázek 4: Blokové schéma PNS-03 [6]**

Na údržbářském PC se zobrazuje vizualizace kolejiště, počet náprav v jednotlivých úsecích (číslo v šedém čtverci) a jejich obsazení. Pokud systém obsahuje stavědlo K-2002, zobrazují se také světla na návěstidlech. Viz snímek z reálného provozu na obrázku 5.



Obrázek 5: PNS-03 v reálném provozu [10]

## **3 ETCS**

Tato kapitola vychází z informací dostupných z [3].

Jedná se o zkratku pro evropský vlakový zabezpečovač (European Train Control System). Tento systém byl navržen, aby nahradil cca 20 národních zabezpečovacích systémů v evropských zemích. Tím by se omezila potřeba výměn hnacích vozidel na hranicích, případně nutnost montovat více různých zabezpečovacích zařízení do jedné lokomotivy. Zároveň se tím navýší bezpečnost provozu, zvýší rychlost jízdy a v případě využití úrovně 3 také propustnost tratě.

### **3.1 Vztah ETCS a demonstrátoru**

Na demonstrátoru bude možné předvádět ETCS do úrovně 2 při použití vagonů (možné rozpojení vagonů), nebo i úroveň 3, pokud pojedou lokomotiva pouze s tendrem (pevné spojení).

### **3.2 Hlavní úrovně ETCS**

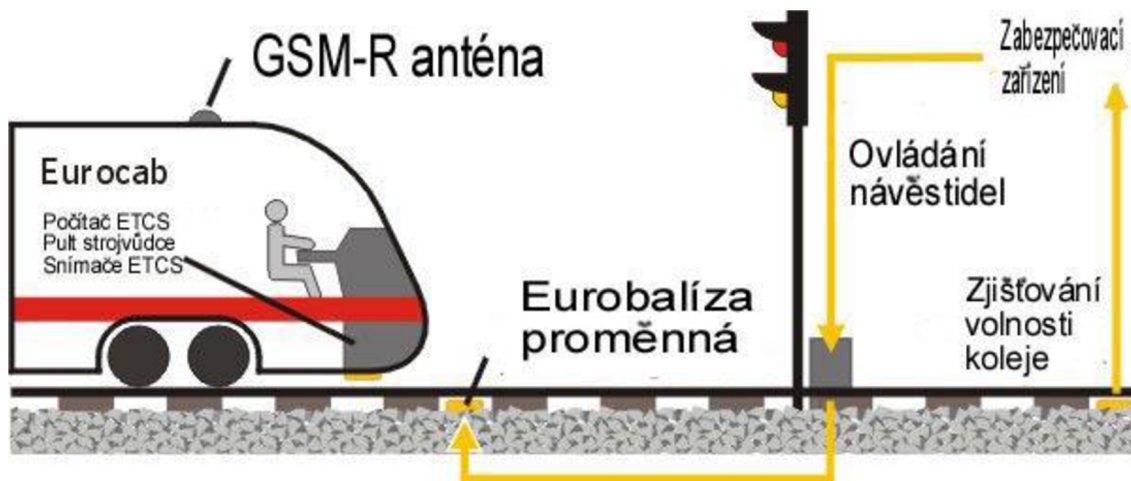
Jsou definovány 4 hlavní úrovně ETCS, v závislosti na vybavení trati a kolejových vozidel.

#### **3.2.1 ETCS L0**

Nejjednodušší na implementaci v lokomotivě. Kolejové vozidlo neobsahuje žádnou část vlakového zabezpečovače a pouze si hlídá maximální rychlost. Veškerou technologii obsahuje trať.

#### **3.2.2 ETCS L1**

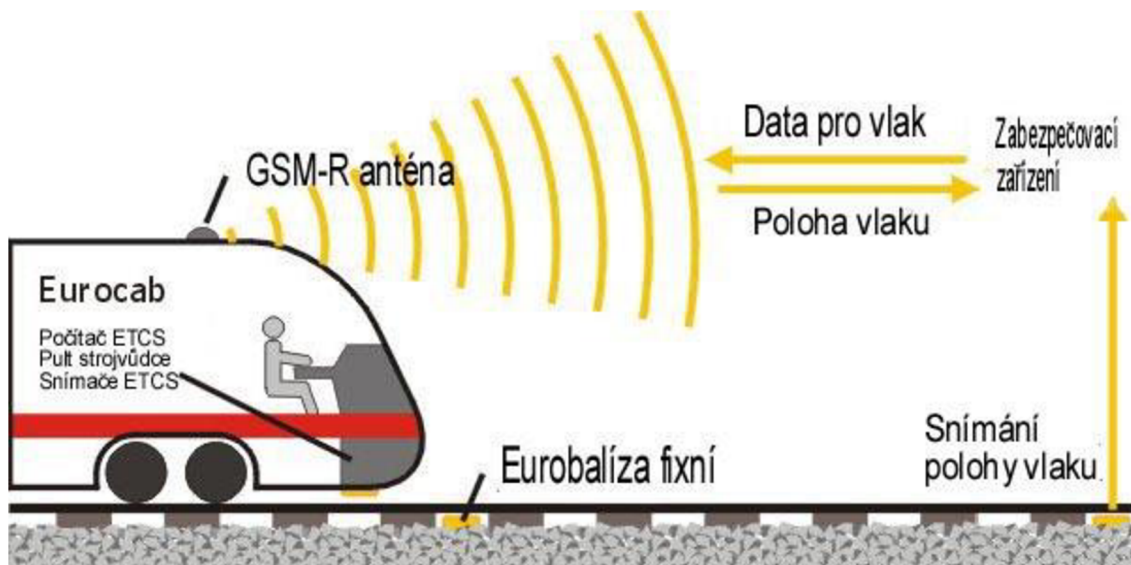
Jedná se o trať s přepínatelnými balízkami, které předávají vlaku informaci nejen o aktuálním traťovém úseku (jako bodový vlakový zabezpečovač), ale také o tom následujícím. Díky tomu je možné průběžně monitorovat maximální dovolenou rychlost vlaku. Návěští je možné přenášet také radiovými obvody nebo smyčkami, když není možné použít balízy. Viz obrázek 6.



Obrázek 6: ETCS úroveň 1 [3]

### 3.2.3 ETCS L2

Oproti L1 využívá fixní balízy, ze kterých zjistí pouze svoji aktuální polohu. Pomocí snímání otáček ze dvou náprav a Dopplerova radaru (3 nezávislé měření rychlosti) počítá vzdálenost od poslední balízy. Tyto informace se předávají prostřednictvím železniční radiové sítě (GSM-R) na radioblokovou centrálu. Ta přes GSM-R vydává povolení k jízdě pro daný vlak. Pro úroveň 2 již nejsou návěští potřeba, ale obsazení/volnost úseků se stále zjišťuje kolejovými obvody nebo počítači náprav. Viz obrázek 7.



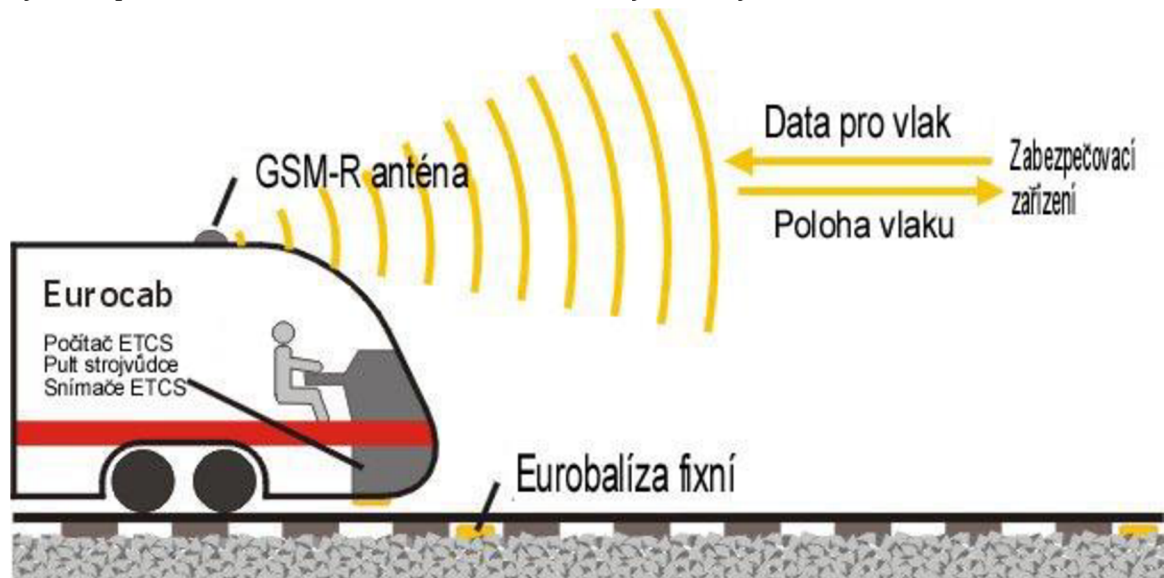
Obrázek 7: ETCS úroveň 2 [3]

### 3.2.4 ETCS L3

Oproti úrovni 2 musí být vlak schopen kontrolovat svoji celistvost. Proto nejsou potřeba kolejové obvody a počítače náprav pro zjišťování obsazení úseků. Velkou

výhodou pak je možnost navýšení propustnosti trati díky tomu, že vlaky mezi sebou samy udržují potřebnou vzdálenost a nejsou tedy potřeba pevné prostorové oddíly.

Tuto úroveň není problém nasadit u ucelených souprav a vlaků tvořených pouze „motorovým vagonem“. Pro soupravy se svěšenými vozy je technologie stále ve stádiu výzkumu, protože zatím neexistuje žádný interoperabilní a bezpečný systém pro detekci celistvosti vlaku se svěšenými vozy. Viz obrázek 8.



Obrázek 8: ETCS úroveň 3 [3]

## 4 DEMONSTRÁTOR

Koncept demonstrátoru vychází z potřeby demonstrovat zájemcům funkci zabezpečovacích zařízení firmy STARMON. Na demonstrátoru by mělo být možné ukázat funkci kolejových obvodů, počítače náprav a v budoucnu bude možné používat i modely balíz a s tím související úrovně ETCS.

### 4.1 Trať a napojení zabezpečovacích zařízení

Celá sestava demonstrátoru se skládá z mnoha částí. Hlavním prvkem je trať sestavená z modelových kolejí pro model vlaku velikosti O, viz obrázek 9. Pro napájení lokomotivy slouží jedna krajní kolej a jako druhý pól slouží prostřední kolejnice.



Obrázek 9: Kolej na demonstrátoru

Funkci kolejového obvodu lze jednoduše realizovat přes obě krajní kolejnice s tím, že se jedna z krajních kolejnic, přes kterou není vedené napájení, odizoluje od napojených kolejí.

Počítač náprav je obtížné na modelovém kolejišti realizovat. Nelze implementovat detekci náprav indukčními snímači, protože je malá kola modelu dostatečně neovlivní. Jako alternativu lze použít zapojení s dvěma LED a fototranzistory.

Balízu je možné vytvořit vložení vysílací IR LED do kolejí. Případně v budoucnu pro realističtější provedení může být do kolejí zabudován NFC tag, který přečte NFC čtečka na modelu lokomotivy.



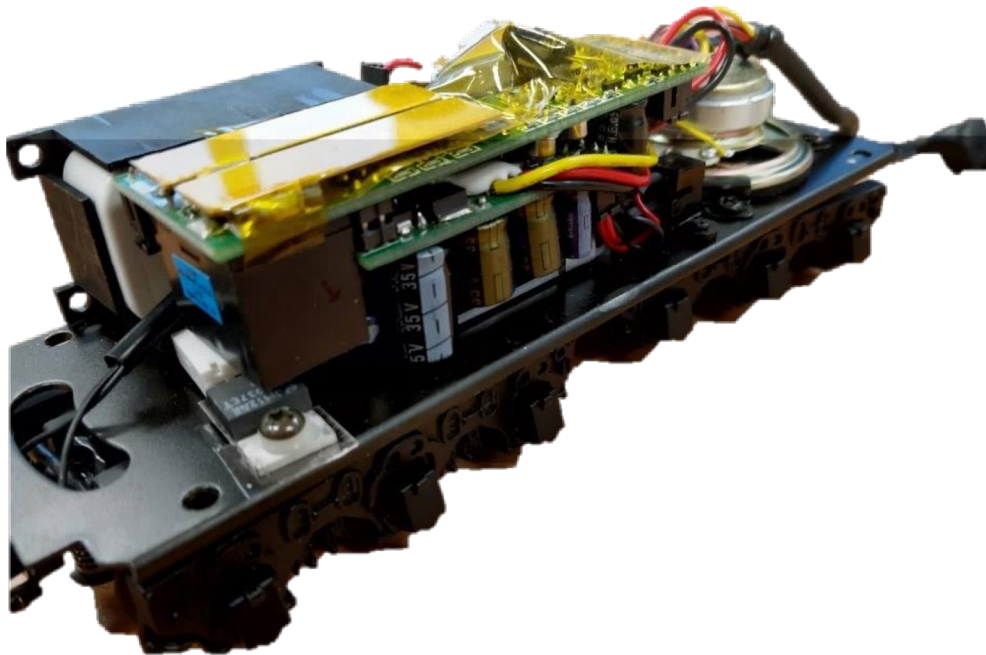
## 4.2 Model lokomotivy

Hlavní aktuálně vyvíjenou částí je model parní lokomotivy, který svojí jízdou po modelovém kolejišti generuje data pro funkci zabezpečovacího zařízení.

Model obsahoval původní elektroniku v tendru lokomotivy (viz obrázek 10 a obrázek 11). Tu bylo třeba nahradit programovatelným řešením. Lokomotiva obsahuje dva motory, jeden slouží jako hlavní pohonná jednotka, druhý se používá pro vyfukování kouře, který vzniká zahříváním lampového oleje topnými rezistory. Také zde nechybí možnost generování různých zvukových efektů. Propojení lokomotivy s řídicím modulem je realizováno propojovacím kabelem na zadní straně lokomotivy.



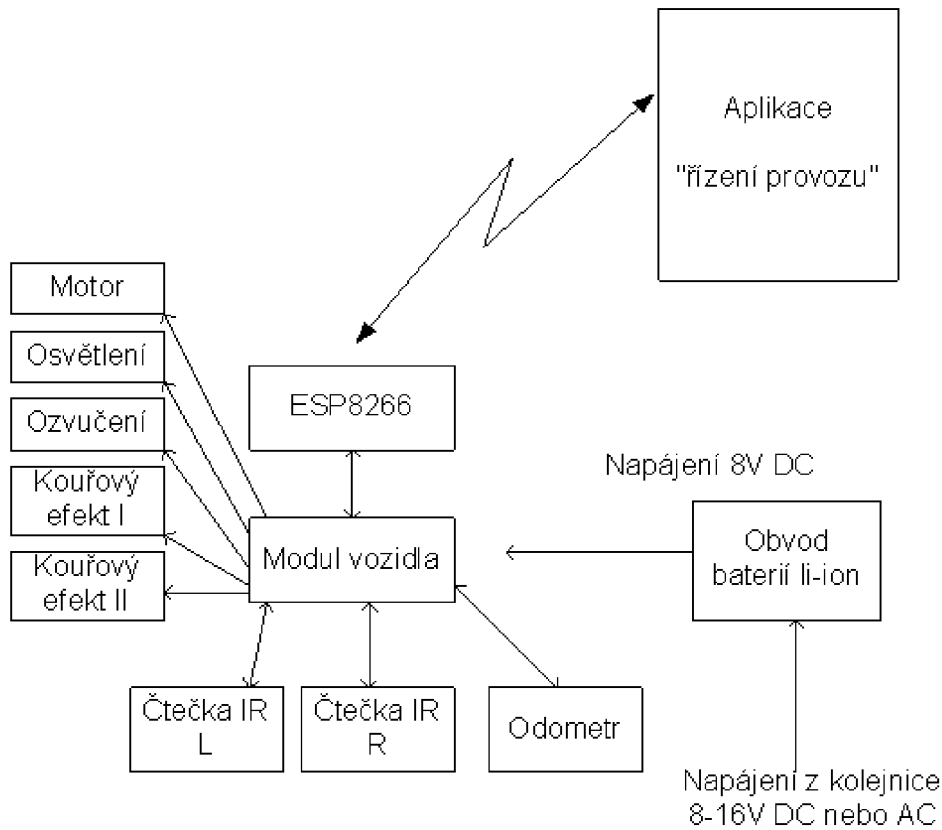
Obrázek 10: Lokomotiva s tendrem pro elektroniku na testovacím kolejišti



Obrázek 11: Tender s původní řídicí elektronikou

### 4.3 Požadavky na nový HW modelu

Celé zapojení musí splňovat podmínky zadané firmou STARMON. Přehledně znázorněné je na následujícím blokovém schématu (obrázek 12).



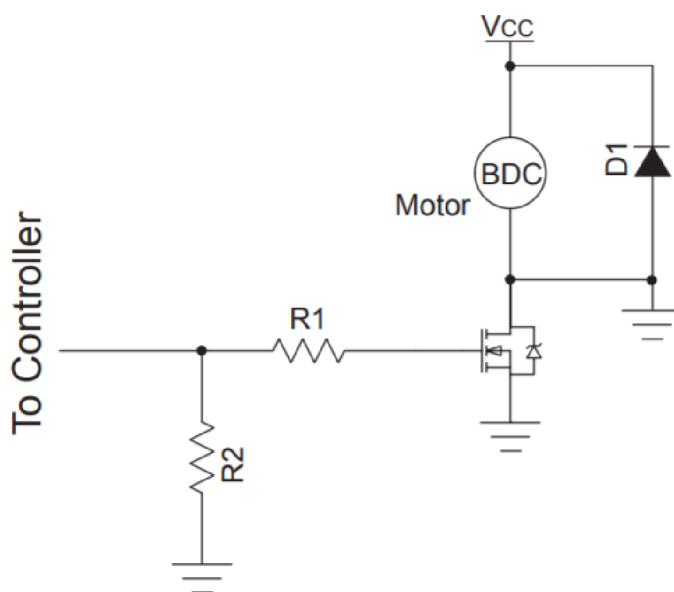
Obrázek 12: Blokové schéma řídicí elektroniky

Nová řídicí deska pro model lokomotivy musí umožňovat plynulé řízení rychlosti hlavního motoru a přepínání směrů. Pro motor vyvíječe kouře stačí řídit rychlost. U hlavního motoru je třeba regulovat rychlost otáčení (regulace bez překmitu) a s pomocí rychlostních ramp ujet nastavenou vzdálenost. Pro snímání otáček je třeba umístit na hřídel motoru nebo na kolo enkodérový disk. Zvukové efekty budou přehrávány do vestavěného reproduktoru. Napájení celého musí být zálohované Li-Ion akumulátorem s možností jeho dobíjení externím napětím z kolejiště. Pro spojení s řídicí aplikací se použije WiFi modul, tak nebude problém s ovládáním modelu z mnoha platforem, včetně mobilních telefonů. Aby bylo možné implementovat některé úrovně ETCS, je nutná příprava na čtení IR balíz.

## 5 KONCEPT HARDWARE

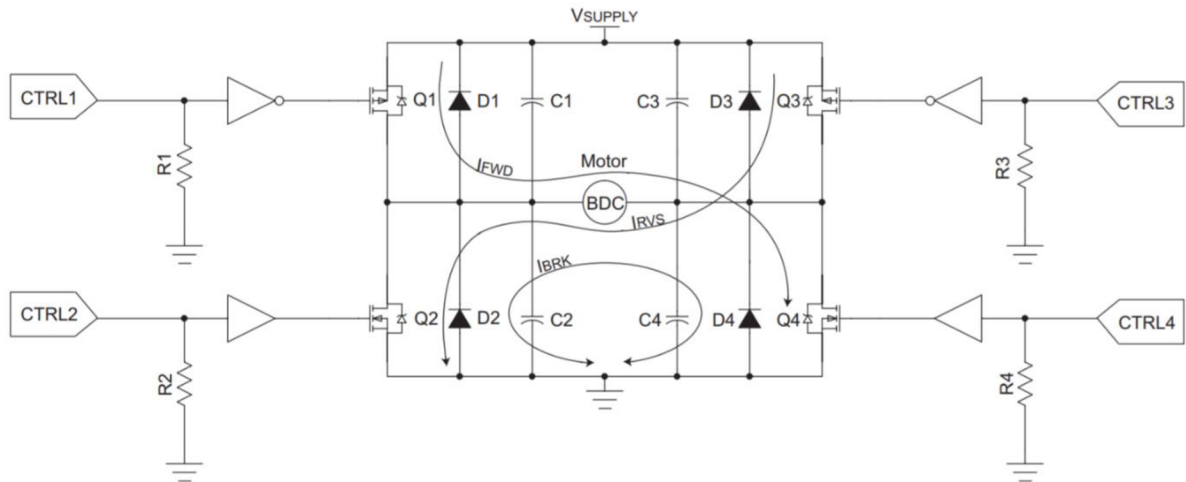
Hlavním prvkem modelu je elektromotor, který je třeba řídit. Existuje několik způsobů řízení.

První možností je řízení pomocí jednoho spínače (viz obrázek 13), obvykle realizovaným tranzistorem typu MOSFET. Ty mají velmi malý vnitřní odpor v sepnutém stavu ( $R_{DS-on}$ ), obvykle až v jednotkách  $m\Omega$ , takže ztráty na nich jsou prakticky zanedbatelné. Dioda D1 chrání tranzistor před zpětně indukovaným napětím motoru, které dosahuje maxima při prudkém zabrzdění motoru. Toto zapojení ale nemohu použít, protože neumožňuje změnu směru otáčení. [11]



Obrázek 13: Jednoduché řízení DC motoru [12]

Další možností je tedy použít můstkové zapojení, kde je možné zvolit směr otáčení. Zapojení využívá 4 spínače, obvykle opět tranzistory typu MOSFET tak, aby bylo možné měnit polaritu napětí na motoru (viz obrázek 14).



**Obrázek 14: můstkový spínací obvod pro DC motor [12]**

Zapojeny jsou opět ochranné diody a navíc kondenzátory, zabraňující vzniku rušení při spínání. Otáčení vpřed je možné po sepnutí tranzistorů Q1 a Q4 (ovládací vstupy CTRL1 a CTRL4) – proud začne procházet ve směru naznačeném šipkou  $I_{FWD}$  a motor se roztočí. Opačný směr zase Q2 a Q3 (vstupy CTRL2 a CTRL3), proud pak prochází ve směru  $I_{RVS}$ . Rychlé zastavení, použitelné například v případě nouze se aktivuje sepnutím tranzistorů Q2 a Q4 (vstupy CTRL2 a CTRL4), čímž se motor zapojí do zkratu. Tento zkratový proud ( $I_{BRK}$ ) může dosahovat vysokých hodnot, u větších motorů s velkou zátěží i desítky ampér. [12]

Pokud bych měřil i proud motorem, bylo by možné regulovat kroutící moment. To by mohlo při vhodném zapracování do algoritmu regulátoru zamezit prokluzu kol. Tento poznatek vychází ze základních rovnic motoru, viz rovnice 1 a rovnice 2:

$$U = C\phi \omega$$

**Rovnice 1: Základní rovnice motoru [11]**

$$M = C\phi I$$

**Rovnice 2: Vztah momentu a proudu DC motorem [11]**

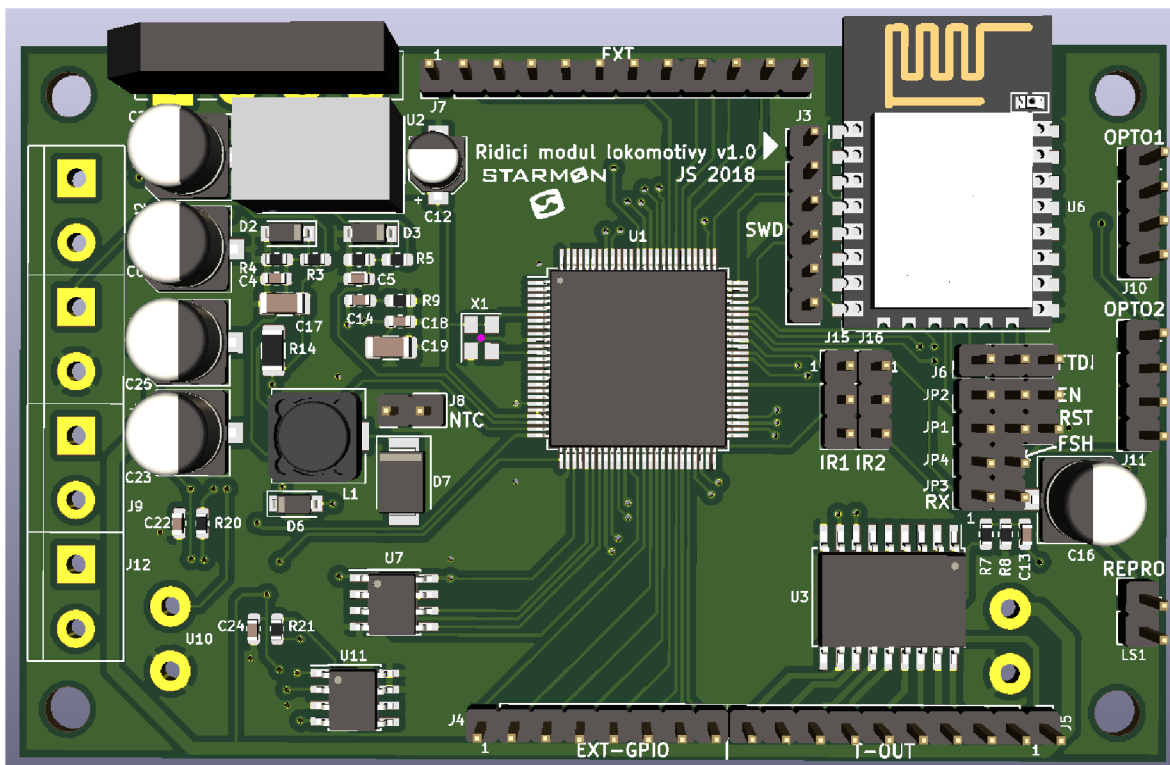
Kde:

- $U$  je napětí na motoru [V]
- $C\phi$  je konstanta motoru [Nm/A]
- $\omega$  je rychlost otáčení motoru [rad/s]
- $M$  je moment na hřídeli motoru [Nm]
- $I$  proud vinutím motoru [A]

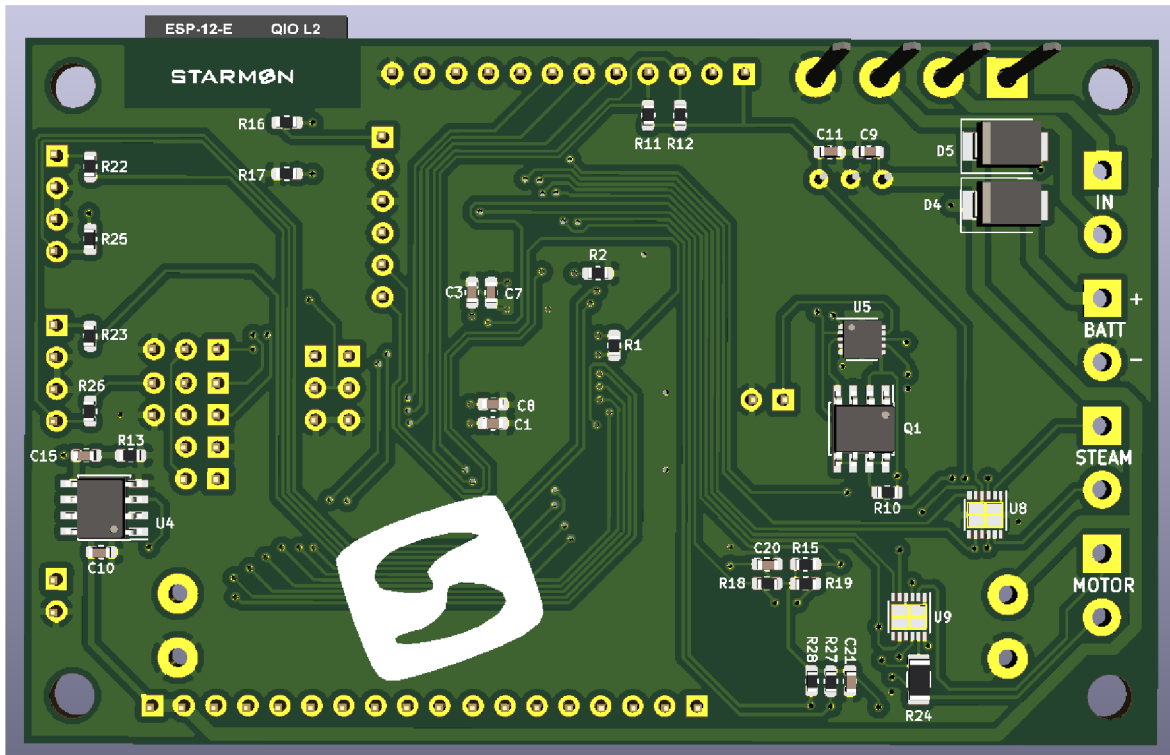
## 6 NÁVRH HARDWARE

Na základě požadavků vytyčených v kapitole 4.3 jsem navrhl následný hardware. Základem zapojení je mikrokontrolér spolupracující s WiFi modulem ESP8266. Mikrokontrolér zajišťuje všechny požadované funkce, mezi které patří regulace rychlosti motorů, čtení odometru a dat z IR přijímačů a případné efekty. Napájení je řešeno primárně z kolejí s možností zálohování z Li-Ion nebo Li-Pol akumulátoru. Na straně počítače a mobilního systému bude dostupná aplikace zobrazující potřebné diagnostické údaje

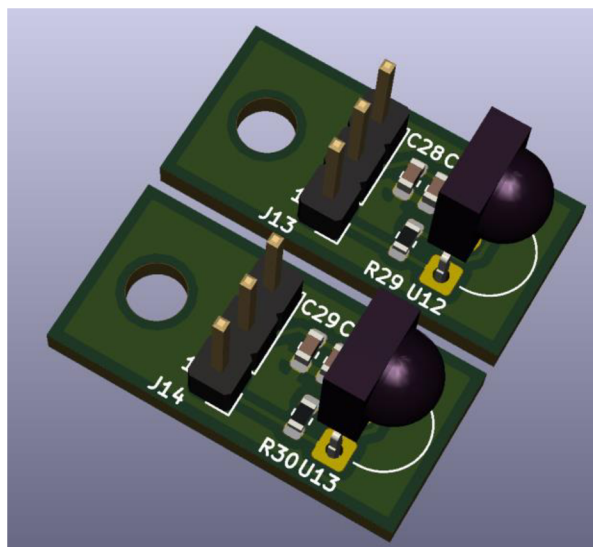
Schéma i následný návrh desky plošných spojů jsem vytvořil ve volně šiřitelném programu KiCad verze 5.0.1. Výsledné schéma i DPS a vygenerované výrobní podklady ve standardním formátu Gerber naleznete v příloze 1 a 2. Jednotlivé bloky schématu jsou popsány v následujících odstavcích. 3D náhled na výslednou desku a pomocné desky IR přijímačů je na obrázcích číslo 15, 16 a 17.



Obrázek 15: Horní strana navržené hlavní DPS



Obrázek 16: Spodní strana navržené hlavní DPS



Obrázek 17: Navržené DPS přijímačů z IR balíz

## 6.1 Mikrokontrolér a řízení

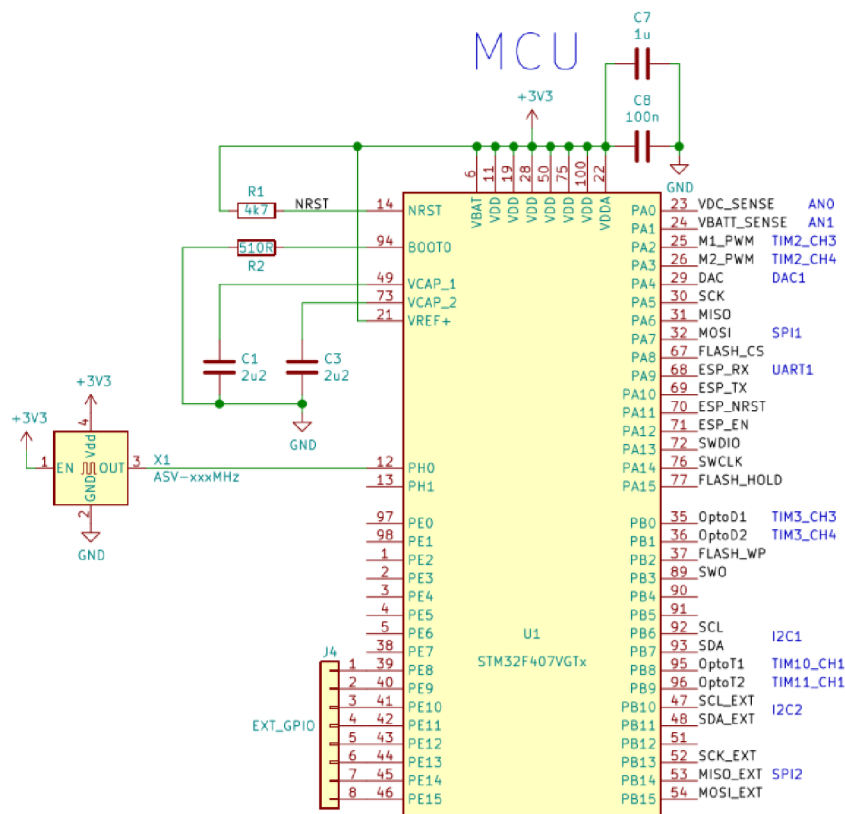
Celá následující kapitola čerpá z informací dostupných v [13], [14] a [15].

Jako jádro celého systému jsem zvolil mikrokontrolér STM32F407, firmy ST Microelectronics, který je postaven na jádře ARM Cortex-M4. Dosahuje maximálního taktu až 168MHz a obsahuje HW modul pro akceleraci operací s čísly s plovoucí desetinnou čárkou (FPU), pro program je k dispozici 1MB paměti typu FLASH a 192kB paměti RAM, s podporou případného rozšíření těchto kapacit externí pamětí připojitelnou přes integrovaný kontrolér FSMC. Vybraná varianta s přesným názvem STM32F407VGT6 se dodává v pouzdře LQFP100, což je běžné 100 pinové pouzdro s vývody na 4 bocích.

Tato řada mikrokontrolerů obsahuje až 17 čítačů/časovačů, z nichž má 12 rozlišení 16 bitů a až dva vysokorychlostní 32bitové časovače taktovatelné až na maximální frekvenci jádra (168MHz). Každý z časovačů ovládá až 4 kanály použitelné pro různé režimy, mezi které patří tzv. Input capture (například pro zjišťování délky vstupního pulzu a měření frekvence), output compare (generování přesných impulsů), PWM a kvadrurní inkrementální enkodér. Další z výhod tohoto integrovaného obvodu jsou jeho tři rychlé analogově digitální převodníky s rozlišením 12b, v součtu 24 vstupních kanálů a každý z převodníků s rychlostí převodu 2,4 milionu vzorků za vteřinu. Ty lze nakonfigurovat i tak, že výsledná rychlost převodu na jednom vstupním kanálu bude až 7,2 MSPS. Opačný převod je také možný bez rozšiřujících integrovaných obvodů pomocí integrovaného dvoukanalového D/A převodníku také s rozlišením 12b. Kromě toho nabízí bohaté vybavení pro standardní digitální komunikaci mimo jiné pomocí linek SPI (až 3x, 42Mbps), I2C (až 3x) a USART (až 6x, 10,5Mbps).

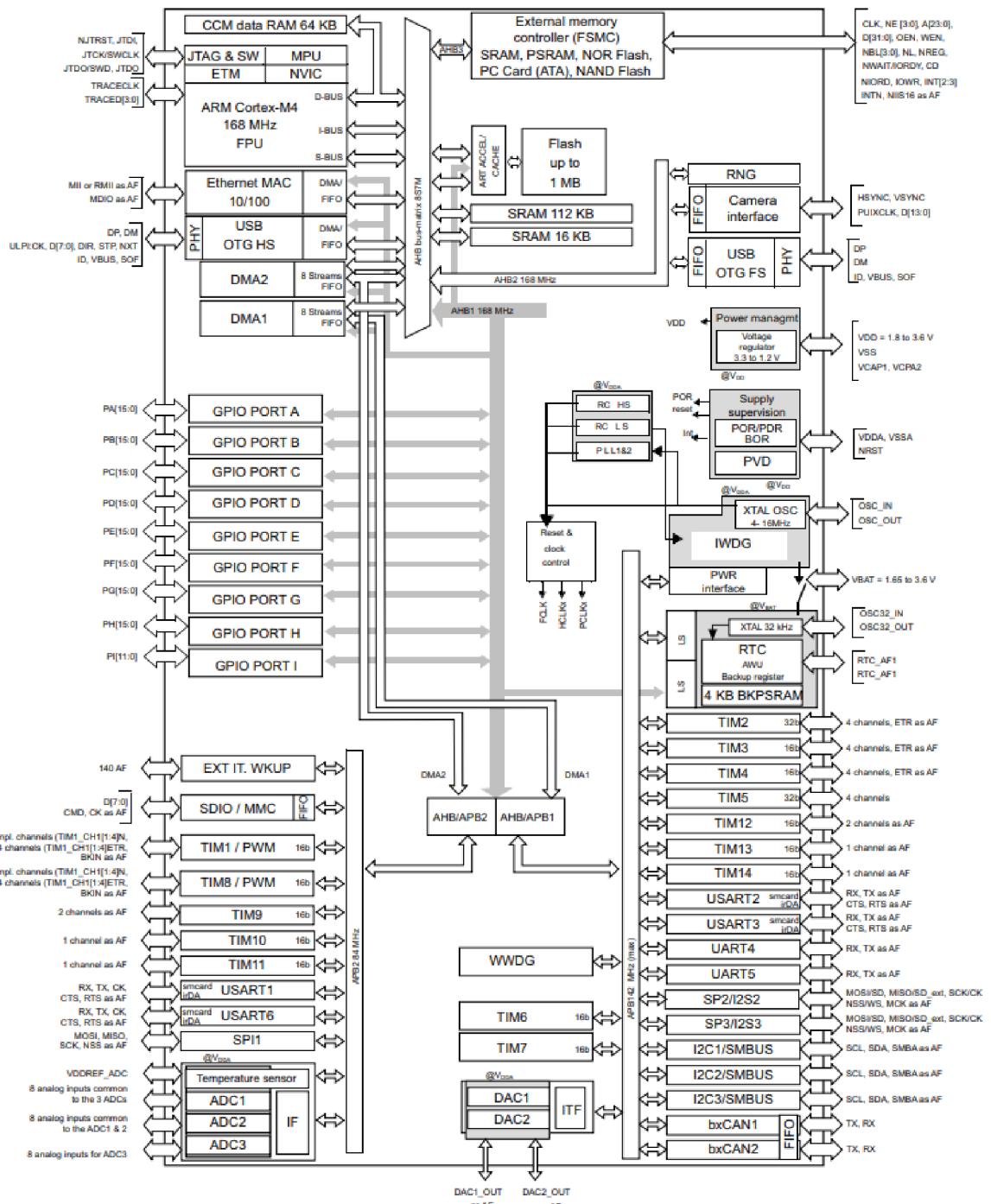
A/D převodník se využívá pro hlídání hodnot vstupních napětí (hlavní napájení a akumulátor), D/A převodník pro informační zvuková sdělení a různé efekty. Většina časovačů bude využita v režimech využívajících jejich I/O kanály, ať už jako PWM generátor (pro řízení motorů, případně jako výstupní signál reflexních optočlenů), nebo v režimu input capture (data z IR přijímačů a data z enkodérů).

Jako zdroj hodinového kmitočtu je použit externí oscilátor o frekvenci 8MHz, která se interně násobí pomocí PLL násobiče na plný kmitočet jádra. Část zapojení mikrokontroléru včetně podpůrných obvodů a rozšiřujícího konektoru je vidět na obrázku 18, zbytek obsahuje pouze GPIO brány a z důvodu velkého rozsahu je uveden v příloze ve schématu. Kompletní blokové schéma mikrokontroléru pro náhled na obsažené periferie je na obrázku 19.



Obrázek 18: Zapojení mikrokontroléru a pomocných obvodů





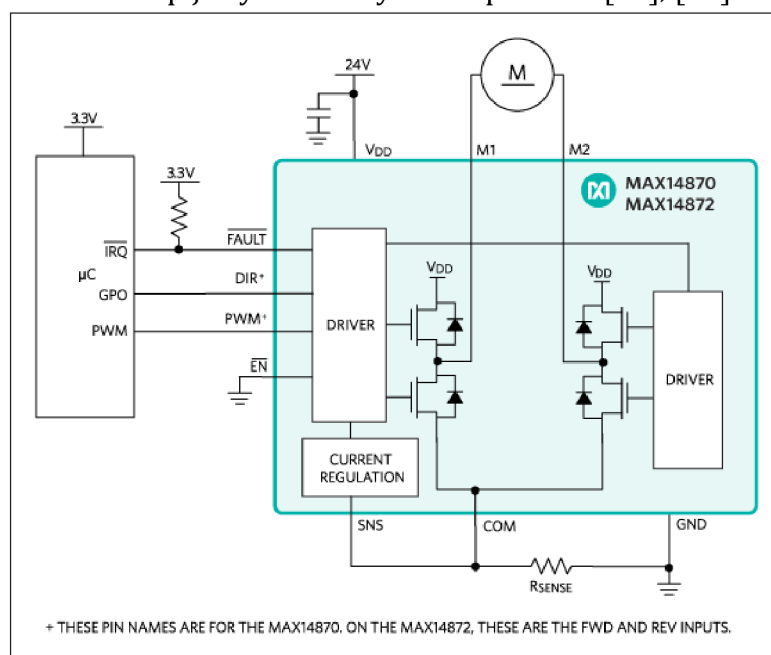
Obrázek 19: Blokové schéma mikrokontroléru řady STM32F4xx [15]

MS19920V3

## 6.2 Řízení motorů

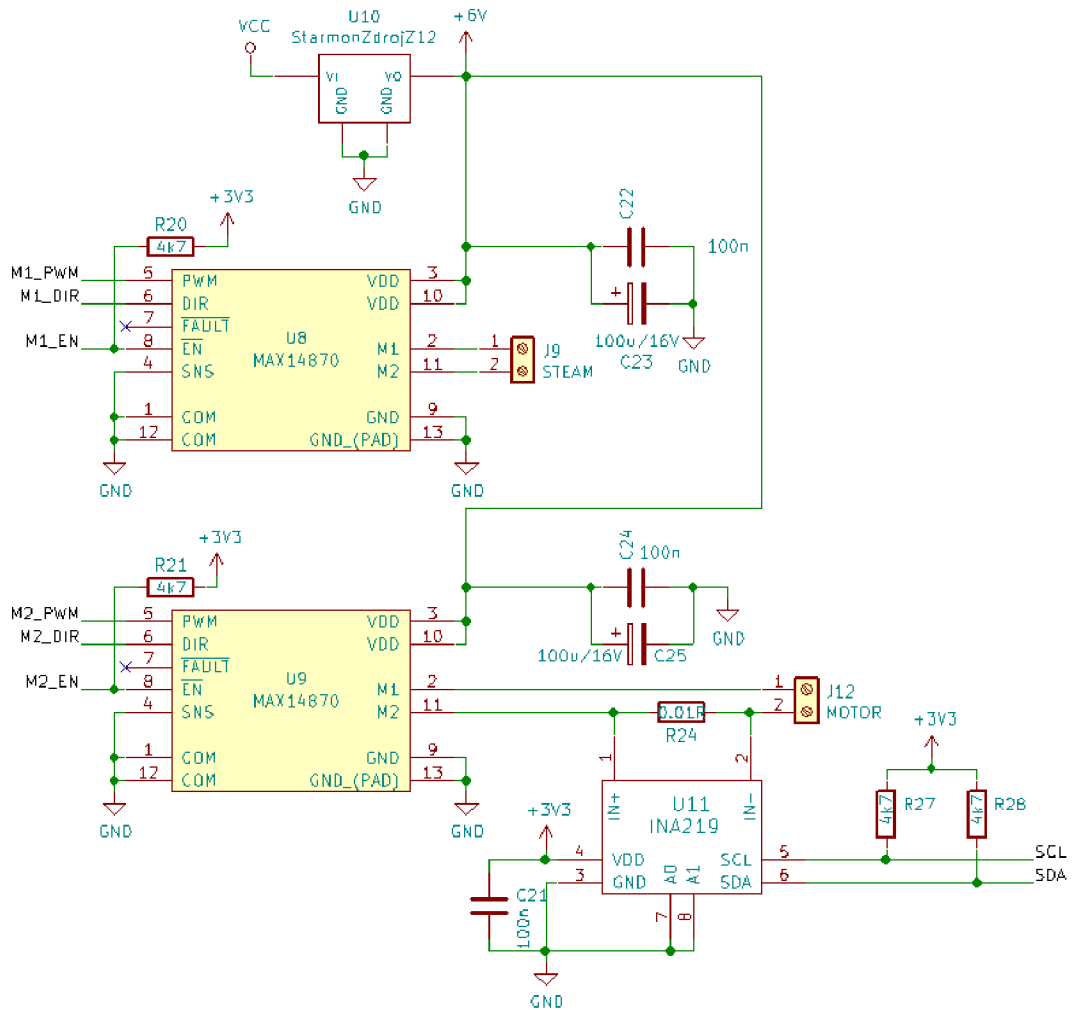
Z rešerše v kapitole 5 vyplývá nutnost použít můstkové řízení motoru. První z možností bylo použít standardní H-můstek pro řízení motorů typu L293, výhodou by byla jednoduchost zapojení a možnost snadné výměny v případě jeho poškození (IO je v pouzdře DIP). Nevýhodou je velký úbytek napětí v na spínacích tranzistorech, jelikož jeho výkonová část se skládá s bipolárních tranzistorů. Z toho důvodu jsem nakonec zvolil integrovaný obvod od firmy Maxim Integrated, a to H-můstek pro řízení motorů MAX14870 (blokové schéma na obrázku 20). Jedná se o poměrně nový integrovaný obvod, který vyniká malým vnitřním odporem v sepnutém stavu ( $280\text{m}\Omega$ ), velkým špičkovým proudem až  $2,5\text{A}$  a širokým rozsahem vstupních napětí (od  $4,5\text{V}$  do  $36\text{V}$ ). Navíc je schopen detekovat poruchu a přetížení motoru pomocí vlastního vstupu pro snímání proudu tekoucího můstkem a informovat o tom řídicí systém pomocí příslušného pinu. Dodává se v pouzdře o 12 pinech pro povrchovou montáž o rozměrech  $3\times 3\text{mm}$ . V mém zapojení nebude funkce ochrany motoru použita.

Výhodou použití H-můstku je možnost otáčení motoru na obě strany i jeho brždění do zkratu. Princip je vysvětlen výše v kapitole 5. [16], [17]



Obrázek 20: Blokové schéma budiče motorů MAX14870 [17]

Reálné zapojení použité v řídicím modulu je na obrázku 21.

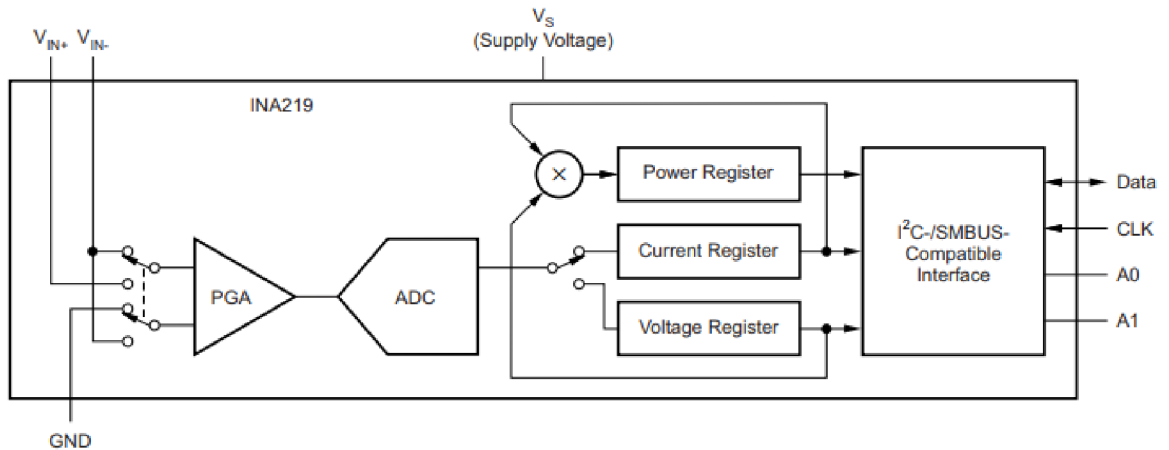


Obrázek 21: Zapojení budičů motorů a měření proudu

Napájení pro motorovou část řeší zdroj Z12 firmy STARMON, jedná se o vlastní řešení modulu spínaného snižovacího zdroje s možným vstupním napětím v rozsahu 4,5 až 42V, nastavitelným výstupním napětím a výstupním proudem až 3,5A trvale a 4,5A špičkově. Tyto parametry jsou více než dostatečné pro napájení motoru s nominálním napětím 6V a odběrem asi 0,5A. Vstupy Enable pro povolení budičů jsou ošetřeny proti nechtěnému zapnutí v případě nenaprogramovaného mikrokontroléru pull-up rezistorem (R20, R21). [17],[18]

Takto jednoduché zapojení stačí pro řízení motoru vyvíječe kouře. Pro možné budoucí rozšíření o regulaci momentu jsem zapojení rozšířil o měření proudu motorem. To by bylo možné realizovat na stejném snímacím rezistoru, kde by MAX14870 detekoval přetížení, ale za cenu vyšší obvodové složitosti (několik operačních zesilovačů a A/D převodník) a navíc možnost detekce přetížení není použita. Proto jsem zvolil jiné řešení, kdy se měří proud pomocí specializovaného

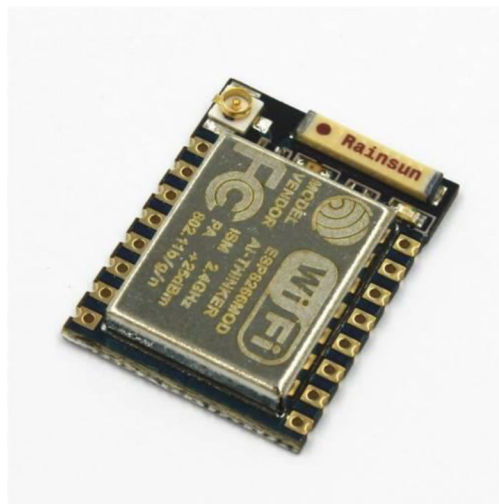
integrovaného obvodu INA219 (U11). Komunikuje přes sběrnici I2C, dosahuje vyšší přesnosti, než které bych byl schopen dosáhnout diskretním řešením a integrovaným A/D převodníkem a má integrované všechny potřebné součásti (až na snímací rezistor) pro měření proudu, napětí i výkonu, (viz obrázek 22) zesilovač s programovatelným zesílením, A/D převodník a interní logiku pro počítání výkonu ze změřeného napětí a proudu. [19]



Obrázek 22: Blokové schéma monitoru napětí a proudu INA219 [19]

### 6.3 Bezdrátové připojení Wi-Fi

Propojení s nadřazenými zařízeními a s diagnostikou obstarává populární modul ESP8266 firmy Espressif Systems ve variantě ESP-07, jako modul s 16 piny, integrovanou anténou a U.FL konektorem pro připojení externí antény (viz obrázek 23)

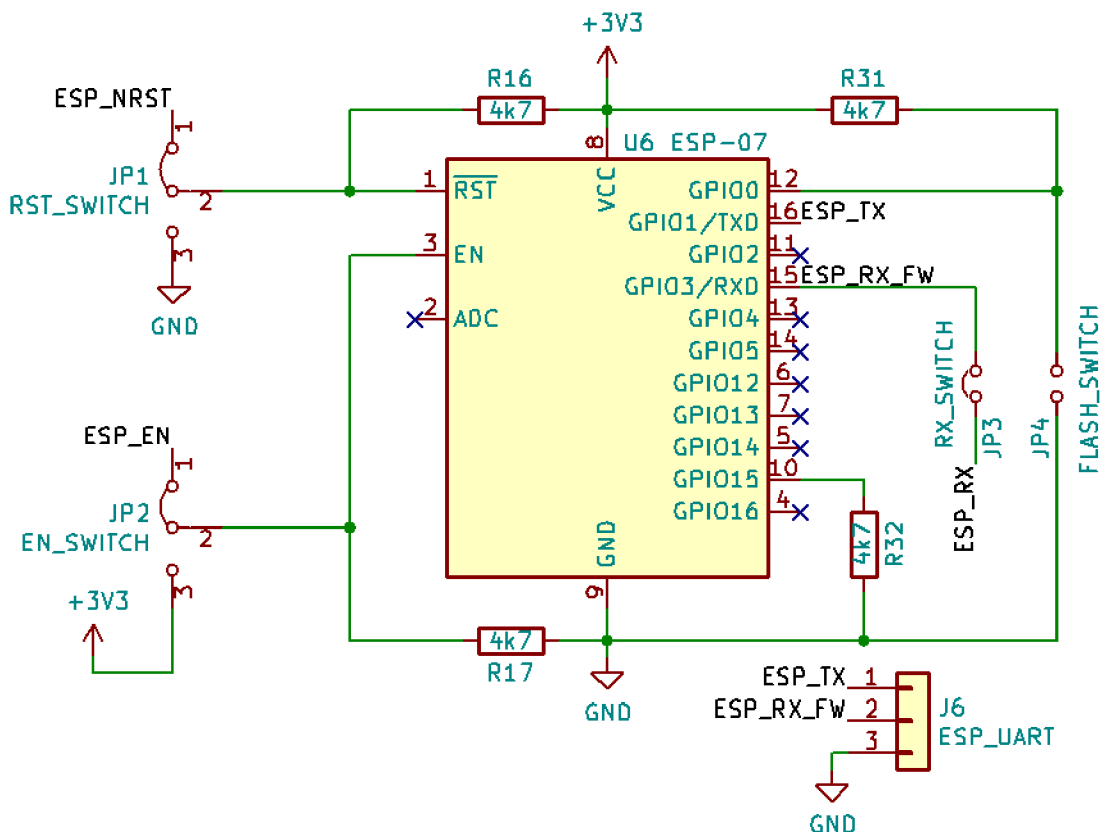


Obrázek 23: WiFi modul EPS8266 – model ESP-07 [20]

Modul je založen na 32bitovém mikroprocesoru s taktem 80MHz, s 80kB datové RAM, 16kB systémové RAM a rozhraním pro připojení QSPI FLASH paměti

pro program. Běžná kapacita programové paměti na modulu se pohybuje v rozmezí od 512kB až do 4096kB. [21]

V tomto případě je v modulu nahrán firmware obstarávající TCP/IP stack, který reaguje na AT příkazy přijaté přes rozhraní UART. Zvolené obvodové zapojení včetně programovacího konektoru pro USB/UART převodník je na obrázku 24.



Obrázek 24: Zapojení WiFi modulu a pomocné obvody

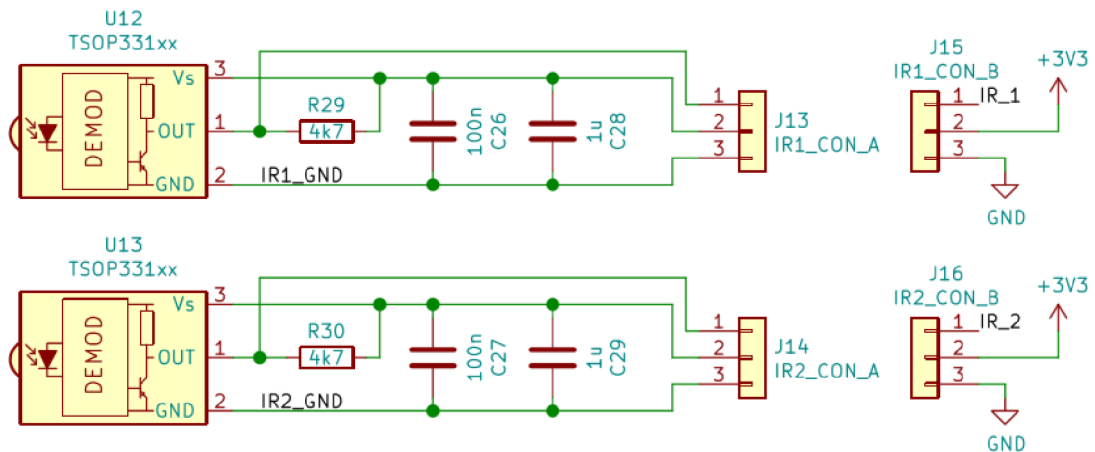
Výhodou tohoto zapojení je možnost odpojení komunikace (signály ESP\_RX a ESP\_TX) povolení modulu (ESP\_EN) a resetu (ESP\_NRST) od mikrokontroléru pro snadné naprogramování modulu přímo v aplikaci. Modul obsahuje také několik GPIO pinů, které se ale v této aplikaci nijak nevyužívají.

## 6.4 Komunikace pomocí IR

Pro čtení informací z kolejiště (aktuální poloha, obsazenost úseku, ...), které by se mělo v budoucnu implementovat jsou na modelu připraveny IR přijímače standardního typu s integrovaným demodulátorem na frekvenci 37,9kHz. V kolejišti se namontují IR vysílače s modulací na stejný kmitočet. Modulace signálu zajistí odolnost před ostatními rušivými zářiči, ať už z venku (Slunce), tak zevnitř (zářivkové trubice). S použitím standardního modulačního kmitočtu jsou spojené jisté klady, jako dostupnost potřebných součástek a jednoduché obvodové řešení,

ale také zápory v podobě možného rušení okolními IR dálkovými ovladači, například od televize. Tento problém půjde částečně eliminovat vhodně navrženým komunikačním protokolem, který se nebude podobat často používaným protokolům Sony a NEC.

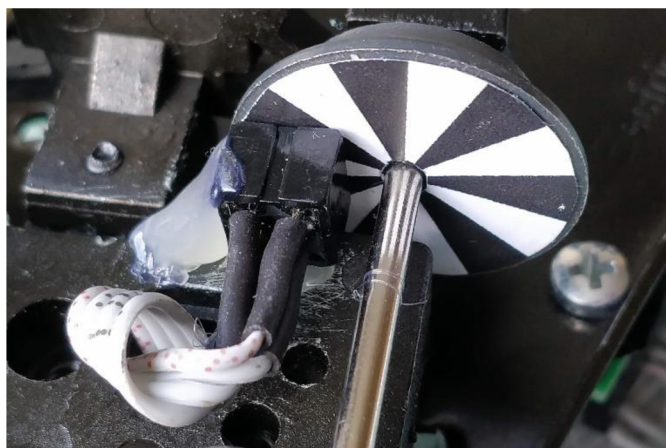
Obvodové řešení je na obrázku 25, v zapojení je pouze nutný pull-up rezistor na datovém pinu, blokovací kondenzátory a konektor pro připojení k hlavní desce.



Obrázek 25: Zapojení infračervených přijímačů

## 6.5 Odometrie

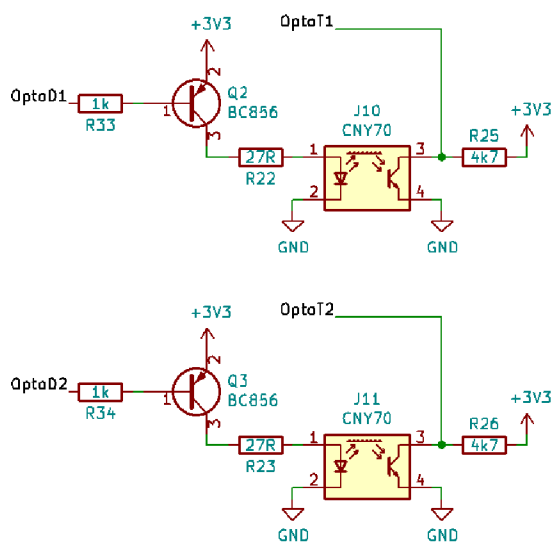
Odometrie se získává z kol tendru, ve kterém je řídicí elektronika. Mnohem vhodnějším místem by byla přímo hřídel motoru, kde by také mnohonásobně stoupl rozlišení, ale to nebylo možné vzhledem k prostorovým omezením v okolí motoru realizovat. Jelikož by bylo obtížné montovat dva snímače s daným posunem pro zjištění směru otáčení (navíc směr otáčení známe z nastavení DC motoru), stačí použít jeden reflexní optočlen. Snímač detekuje proužky na enkodérovém disku se sedmi černými proužky (viz obrázek 26), při otáčení tak generuje v ideálním případě obdélníkový signál. Z takto získaného signálu se pomocí zjištěné délky pulzu získá rychlost otáčení. Integrací rychlosti otáčení dostáváme ujetou dráhu.



**Obrázek 26: Umístění enkodéru a enkodérový disk**

Obvodové řešení je na obrázku 27.. Takovéto zapojení bylo zvolené z důvodu možnosti modulace signálu diodou, v případě, že by se v budoucnu vyskytly problémy s rušením okolním IR zářením. LED je připojena na výstup mikrokontroléru s podporou generování PWM, což bude modulační kmitočet. Detekce takového modulovaného signálu pak na straně mikrokontroléru může probíhat vhodně nakonfigurovanou jednotkou časovače v režimu input capture, kterou je možné měřit délku pulzu.

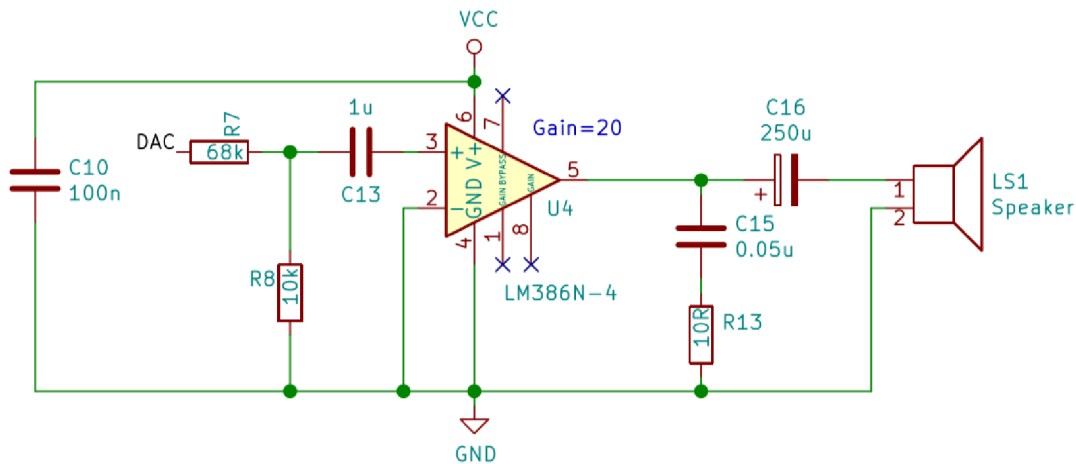
Oproti první verzi DPS byly výstupy mikrokontroléru proudově posíleny tranzistory, aby bylo možné dosáhnout plného proudu 50mA diodami optočlenu.



**Obrázek 27: Optočlenu pro odometrii**

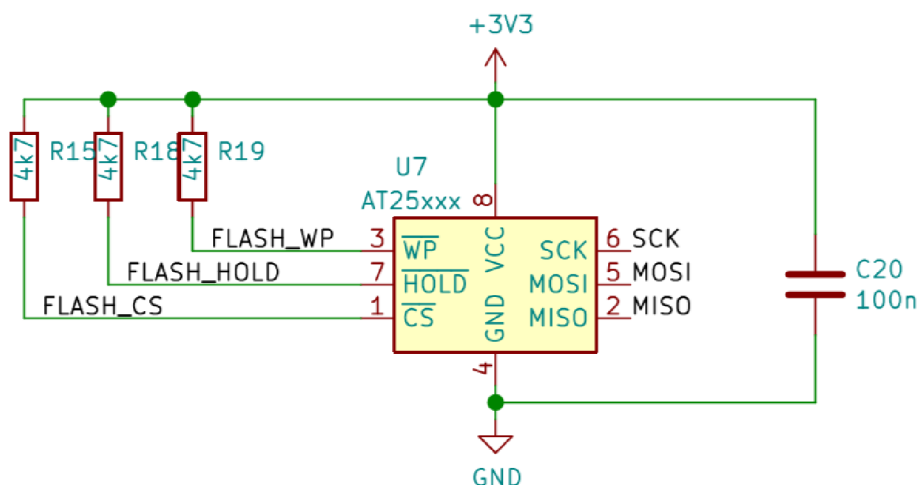
## 6.6 Zvukové efekty a uložště zvuků

Pro generování zvuků a oznamovacích hlášení je k dispozici standardní nf zesilovače pro nízká napájecí napětí, LM386N. Zapojení je převzaté z katalogového listu, jen vstupní signál je upraven děličem na vhodnou úroveň. Výstupem D/A převodníku, kterým bude audio signál generován je napětí 0-3,3V, což by při 20násobném zesílení LM386 vedlo k přebuzení. Proto je na vstupu odporový dělič, který maximální hodnotu vstupního napětí 3,3V sníží na napájecí napětí LM386 / 20 pro maximální vybuzení zesilovače. Výstupní výkon takového zapojení činí asi 325mW. Zapojení je na obrázku 28. [22]



Obrázek 28: Audio zesilovač s LM386

Zvukové efekty a hlášení jsou uloženy v externí paměti typu FLASH s kapacitou 32Mb, připojené přes rozhraní SPI (viz obrázek 29). V případě potřeby by bylo možné realizovat i dynamicky vytvářené hlášení skládáním hlásek za sebe s vhodným spojením mezi nimi. [23]

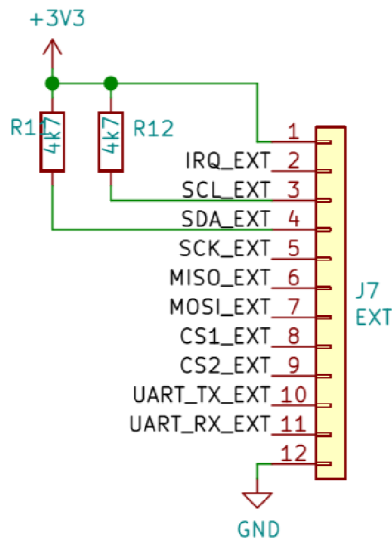


Obrázek 29: Externí datová FLASH paměť



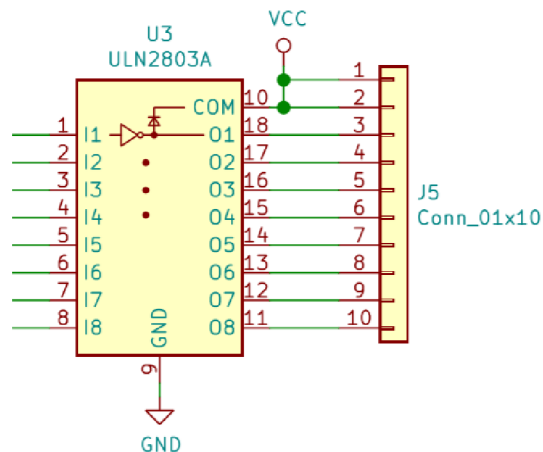
## 6.7 Rozšiřující konektory, posílené výstupy

Pro případné rozšíření zapojení je k dispozici několik konektorů, jeden obsahující pouze GPIO piny brány E, bity 8-15 (konektor J4), druhý (J7) s připojením napájení 3,3V, jedné sériové linky UART, I2C a SPI se dvěma výstupy pro výběr obvodu (chip select, CS). Tento konektor by mohl sloužit například pro rozšíření čtečkou NFC čipů v kolejích a další periferní zařízení (viz obrázek 30).



Obrázek 30: Hlavní rozšiřující konektor

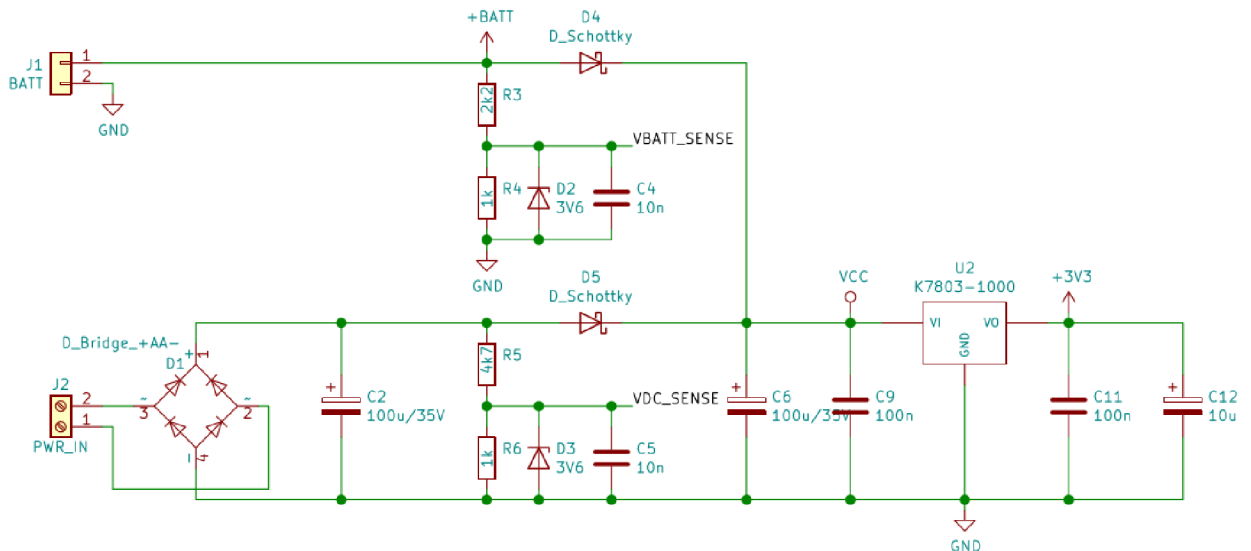
Připojení periférií s většími výkonovými nároky je možné pomocí konektoru J5 (viz obrázek 31), na který jsou vyvedeny výstupy mikrokontroléru posílené integrovaným obvodem ULN2803A. Tento integrovaný obvod obsahuje 8 Darlingtonových dvojic tranzistorů, každá s maximálním výstupním proudem 500mA a povoleným napětím 50V. [24]



Obrázek 31: Tranzistorově posílené výstupy

## 6.8 Hlavní napájecí obvody

Napájení celého modulu zajišťují dva zdroje, jeden z nich napájí pouze motory a byl zmíněn v kapitole 6.2, druhý vytváří stabilní 3,3V pro celou logickou část. Celé zapojení je zálohováno z Li-Ion nebo Li-Pol akumulátoru s příslušnými nabíjecími obvody (viz kapitola 6.9). Napájecí obvod je na obrázku 32.



Obrázek 32: Hlavní napájecí obvody s usměrňovačem a stabilizací

Hlavním vstupem je konektor J2, kam se připojí vodiče od sběračů z kol. Napětí se dále usměrní můstkem v Graetzově zapojení D1 a vyhladí kombinací kondenzátorů C2, C6 a C9. Výhodou použití usměrňovače je možnost napájet kolejiště jak střídavým, tak stejnosměrným napětím a není potřeba dbát na správnou polaritu. Vstupní napětí si měří mikrokontrolér přes dělič R5, R6 (a napětí baterie přes R3, R4). Děliče jsou ošetřené proti přepětí zenerovou diodou D3 (D2) a proti indukovaným rušivým signálům kondenzátorem C5 (C4). Napětí baterie a hlavní vstupní napětí jsou přes schottkyho diody sloučeny a rozvedeny jako hlavní napájecí napětí VCC. Z takto vytvořeného napětí se pomocí spínaného zdroje U2, který je schopen dodat až 1A, stabilizuje napětí pro logiku na hodnotu 3,3V, jehož výstup je opět ošetřen proti kmitání a vyhlazen kondenzátory C11 a C12.

## 6.9 Záložní napájecí obvody

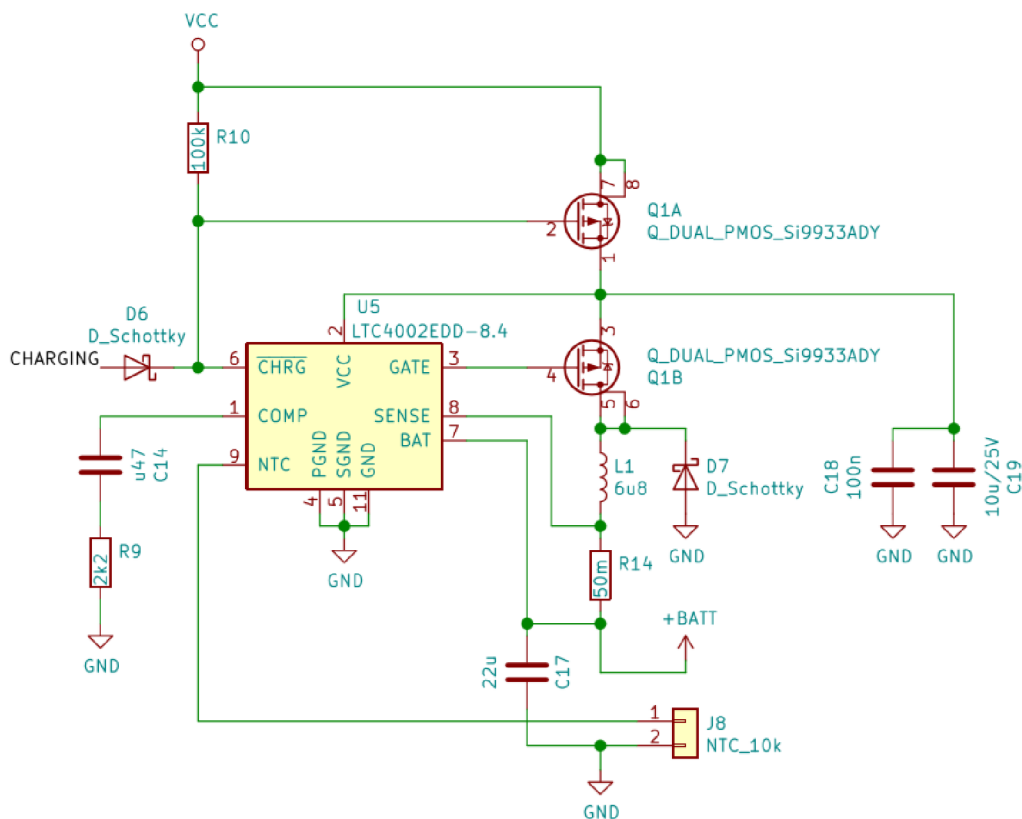
Požadavkem bylo také realizovat zálohování hlavního zdroje a nabíjení pomocného akumulátoru. Pro tento úkol poslouží integrovaný nabíječ Li-Ion/Li-Pol akumulátorů v zapojení 2S (dva články zapojené sériově) firmy Linear Technology (nyní součástí Analog Devices) LTC4002. Tento integrovaný obvod obsahuje vše potřebné pro nabíjení 2S akumulátorů, navíc i mnoho ochran, jako například ochrana před přehřátím akumulátoru nebo opačným zapojením. Hodnota nabíjecího proudu se volí hodnotou snímacího rezistoru R14 podle rovnice 3.

$$I_{BAT} = 100mV/R_{sense}$$

Rovnice 3: Výpočet nabíjecího proudu LTC4002

kde  $I_{BAT}$  je výsledný nabíjecí proud [A],  $R_{sense}$  je hodnota snímacího odporu [ $\Omega$ ] a 100mV je hodnota interní reference. [25], [26]

Zapojení s menšími modifikacemi přejaté z katalogového listu [26] obvodu je na obrázku 33. Součástky Q1B, L1 a D7 tvoří snižující měnič, kterým se upraví hodnota vstupního napětí na potřebnou velikost. Nabíjení je signalizováno mikrokontroléru přes schottkyho diodu D6, která odděluje vyšší napětí nabíjecího obvodu od logiky.



Obrázek 33: Záložní napájení s nabíjecími obvody

## 7 NÁVRH FIRMWARE

Firmware je psaný v jazyce C++. Základem programu je FreeRTOS, více vláknový operační systém pro embedded zařízení. Obsahuje plnou podporu vláken, semaforů a časovačů, což je pro tento projekt více než dostatečné. Pro abstrakci hardware a pomoc s inicializací komplexnějších periférií jsem použil volně dostupnou knihovnu od ST Microelectronics z řady STM32Cube s názvem STM32CubeF4.

V hlavní funkci programu, main, se nejprve provede inicializace všech periférií a následně se založí vlákna pro obsluhu regulátorů, detekci příkazů z WiFi a třetí vlákno pro kontrolu napájení modulu. Generování PWM signálu pro motory probíhá pomocí časovače v režimu PWM.

Zdrojové kódy firmware naleznete v příloze 2.

### 7.1 Obsluha regulátorů

Všechny regulátory jsou implementovány jako PSD regulátory s nastavitelnými konstantami  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  za pomoci knihovny CMSIS (Cortex Microcontroller System Interface Standard). Nebylo by problematické je navrhnout přímo v jazyce C++, ale implementace v rámci CMSIS je dostupná na všech mikrokontrolérech s jádrem ARM Cortex.

Toto vlákno se spouští každou milisekundu, počítá výstup regulátorů a zapisuje výstupní hodnoty plnění PWM pro motory do odpovídajících kanálů PWM časovače.

### 7.2 Detekce příkazů z WiFi

WiFi modul jsem nakonfiguroval přes AT příkazy jako TCP/IP server na portu 80. Pro komunikaci je povolené jedno připojení na tento server. Protože komunikace probíhá přes protokol TCP, nemusí můj komunikační protokol již řešit kontrolu správnosti dat pomocí CRC, to obstarává samotný TCP protokol.

Pro detekci a vysílání dat přes WiFi je nakonfigurovaný modul USART, který komunikuje s WiFi čipem rychlostí 115200bps. Vysílání dat probíhá ručně v polling režimu, příjem se uskutečňuje pomocí DMA do kruhového bufferu o velikosti 512B. Detekce paketu se provádí jednou za 20ms a po jeho vyhodnocení se nastaví odpovídající proměnné.

#### 7.2.1 Komunikační protokol

Pro komunikaci jsem navrhl jednoduchý komunikační protokol postavený na posloupnostech ASCII znaků, například „%C>led=1#“. Každý paket začíná speciálním symbolem „%“, následuje znak označující typ zprávy (příkaz, systémová

informace, telemetrie, textová zpráva) a po „>“ pokračuje samotná zpráva. Celý balík je ukončen symbolem „#“. Takovýto protokol je kompromisem mezi dobrou čitelností dat člověkem a rychlostí přenosu. Kompletní popis všech příkazů následuje v tabulce 1.

%C>led=X#	Zapne nebo vypne LED	X=0,1
%C>heater1=X#	Zapne nebo vypne 1. topení pro vyvíječ kouře	X=0,1
%C>heater2=X#	Zapne nebo vypne 2. topení pro vyvíječ kouře	X=0,1
%C>motor=X#	Nastaví směr motoru	X=F,B,S,E F... vpřed B... vzad S... stop E... brzda
%C>steam=X#	Zapne nebo vypne motor vyvíječe kouře	X=0,1
%C>motorspeed=X#	Nastaví rychlost motoru v manuálním módu	X=0-1024
%C>steamspeed=X#	Nastaví rychlost motoru vyvíječe kouře	X=0-1024
%C>play=X#	Přehraje danou melodii	X=1,2 Index melodie
%C>reg=X#	Zapne nebo vypne regulátor	X=0,1
%C>infosys#	Požádá o systémové informace	
%C>infotelemetry#	Požádá o telemetrii	
%C>autotelemetry=X#	Zapne nebo vypne automatickou telemetrii	X=0,1
%C>measurechar#	Požádá o změření odezvy rychlosti a proudu na jednotkový skok PWM	
%C>speed=X#	Nastaví požadovanou rychlost pro regulátor	X [cm/s]
%C>distance=X#	Nastaví požadovanou vzdálenost pro regulátor	X [cm]
%C>regspeed=Kp,Ki,Kd#	Nastaví konstanty PSD regulátoru rychlosti	
%C>lock=X#	Zapne nebo vypne cívku spřáhla	X=0,1

**Tabulka 1: Seznam povelů**

Odpovědi z modulu ve vlaku se odesílají v pevně daném formátu pro telemetrii (popis v tabulce 2):

„%T>time=X,setspeed=X,speed=X,setdist=X,dist=X,pwm=X,current=X#“

time=X	Čas odeslání od zapnutí	X [ms]
setspeed=X	Nastavená rychlost	X [cm/s]
speed=X	Aktuální rychlost	X [cm/s]
setdist=X	Nastavená dráha	X [cm]
dist=X	Aktuální dráha	X [cm]
pwm=X	Aktuální PWM motoru	X [1-1024]
current=X	Aktuální proud motoru	X [mA]

Tabulka 2: Informace v paketu telemetrie

Nebo pro systémové informace (popis v tabulce 3):

„%S>ubatt=X,uext=X,charging=X#“

ubatt =X	Napětí baterie	X [V]
uext =X	Napětí ext. zdroje	X [V]
charging =X	Informace o nabíjení	X=0,1

Tabulka 3: Informace v paketu systémových informací

Nebo jako textová zpráva pro vypsání do okna zpráv:

„%M>X#“

kde X je libovolně dlouhá textová zpráva

## 7.3 Měření rychlosti a výpočet ujeté vzdálenosti

Detekce pulzů pro měření rychlosti a samotný výpočet rychlosti funguje na principu měření délky pulzu z optického enkodéru. Tento způsob jsem zvolil z toho důvodu, aby bylo možné měřit i pomalý pohyb vlaku. To by totiž bylo velmi problematické při běžném počítání impulzů za jednotku času, nebo by vedlo k dlouhé časové konstantě. Pokud do 1s nepřijde žádný impulz, prohlásí se rychlost za nulovou.

### 7.3.1 Nastavení hardwarového časovače

Předděličku časovače jsem spočítal tak, aby každé navýšení časovače odpovídalo periodě  $T = 100\mu s$ . Pro detekci stojícího kola jsem nastavil maximální hodnotu časovače tak, aby odpovídala 1s. Příslušný kanál časovače je nastaven tak, aby vyvolal událost „capture“ pouze při náběžné hraně, čímž potlačím problém s rozdílnou délkou impulzu z černé a bílé plochy enkodérového disku za cenu snížení rozlišení. Po startu časovače se aktivují přerušování pro případ události „capture“ (přišel impulz) a pro událost „update“ (časovač dosáhl hodnoty v period registru a vynuloval se). Při vyvolání „update“ události se zavolá rutina přerušování,

kteřá vynuluje výslednou rychlost. Pokud dojde k detekci pulzu („capture“), přepočítá se délka impulsu přes známý poloměr kola a počet impulsů na otáčku na rychlost podle jednoduchého vzorce (rovnice 4):

$$v = \frac{o}{n \times t} = \frac{1,7\pi}{7 \times t}$$

**Rovnice 4: Výpočet rychlosti z enkodéru**

Kde „v“ je výsledná rychlost [cm/s], „o“ značí obvod kola [cm], „n“ udává počet začerněných segmentů na enkodérovém disku a „t“ je doba impulsu změřená časovačem [s].

### 7.3.2 Problémy při měření

Takto zpracovaná hodnota se uloží do historie a spočítá se klouzavý průměr z 5 minulých hodnot, aby se předešlo nežádoucím skokům. Tato filtrace je velmi důležitá, ale při větším počtu průměrovaných hodnot může zanášet do zpětné vazby dopravní zpoždění. Zvolená hodnota je kompromis mezi perfektní filtrací a dlouhým zpožděním. Při hmotnosti vlaku stejně není reálné, aby skokově změnil svoji rychlost. Tímto způsobem se částečně zbavíme rušivých vlivů, které negativně působí na vlastní měření, hlavně jsem se setkal s nerovností kolejí (hlavně ve spojích kolejnic a občas u pražců) a kolejovými oblouky, kdy se kolo chvíli netočí a nečistotami na disku, které jsou schopny odrazit nebo zastínit světelný paprsek emitovaný reflexním optočlenem.

### 7.4 Měření napětí zdrojů

Analogově-digitální převodník čte na vyžádání programu analogové vstupy, na které jsou připojené odporové děliče pro měření napětí akumulátoru a externího zdroje. Protože není potřeba mít tuto hodnotu vždy aktuální, spouští se pouze manuálně na pokyn softwaru, když si některý z ovládacích programů vyžádá jejich hodnotu.

## 8 NÁVRH A VÝSLEDKY REGULACE

V následujících kapitolách popíšu můj postup v návrhu regulátoru pro rychlost a regulace ujeté dráhy spolu s rychlostními rampami.

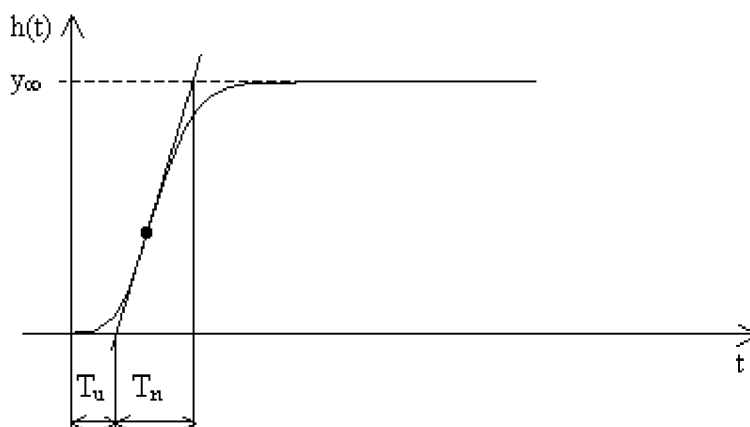
### 8.1 Identifikace soustavy

Nejprve bylo potřeba identifikovat soustavu, aby bylo možné spočítat vhodný regulátor v programu Matlab. Protože matematický popis systému na základě fyzikálních zákonů by byl složitý – neznámé parametry motoru, musel bych je změřit, složitě počítat se setrvačností celého vlaku atd. – chtěl jsem identifikovat soustavu pomocí jednotkového skoku.

Na vstup systému jsem přivedl jednotkový skok (z 0 na plné plnění PWM) a měřil jsem odezvu rychlosti. Protože signál rychlosti nebyl úplně čistý, musel jsem jej nejprve vyfiltrovat (viz kapitola 7.3.2 Problémy při měření).

#### 8.1.1 Strejcová metoda

Pro první pokusy s identifikací systému jsem použil Strejcovu metodu, která spočívá v nalezení inflexního bodu a odečtení doby náběhu  $T_n$  a doby průtahu  $T_u$ , viz obrázek 34. To by však přineslo velkou nepřesnost, protože inflexní bod například pro systém 3. řádu leží přibližně v třetině ustálené hodnoty a při rozjíždění lokomotivy nemám přesná data pro nízké rychlosti. Proto tato metoda není vhodná pro moji soustavu a způsob měření.



Obrázek 34: Princip Strejcovy metody [27]



## 8.1.2 Metoda nejmenších čtverců

Zvolil jsem tedy k identifikaci systému metodu nejmenších čtverců. Jejím principem je sčítání kvadrátů odchylek průběhu reálné soustavy a aproximované soustavy. Hodnota tohoto součtu je výsledkem kritéria a vyjadřuje „kvalitu“ aproximované soustavy. Čím nižší hodnota, tím lepší aproximace.

Jako aproximovanou soustavu jsem zvolil tvar přenosu  $n$ -tého řádu (viz rovnice 5) se zesílením odečteném z ustálené hodnoty reálného systému:

$$G_s = \frac{K}{(Ts + 1)^n} = \frac{32,5}{(Ts + 1)^n}$$

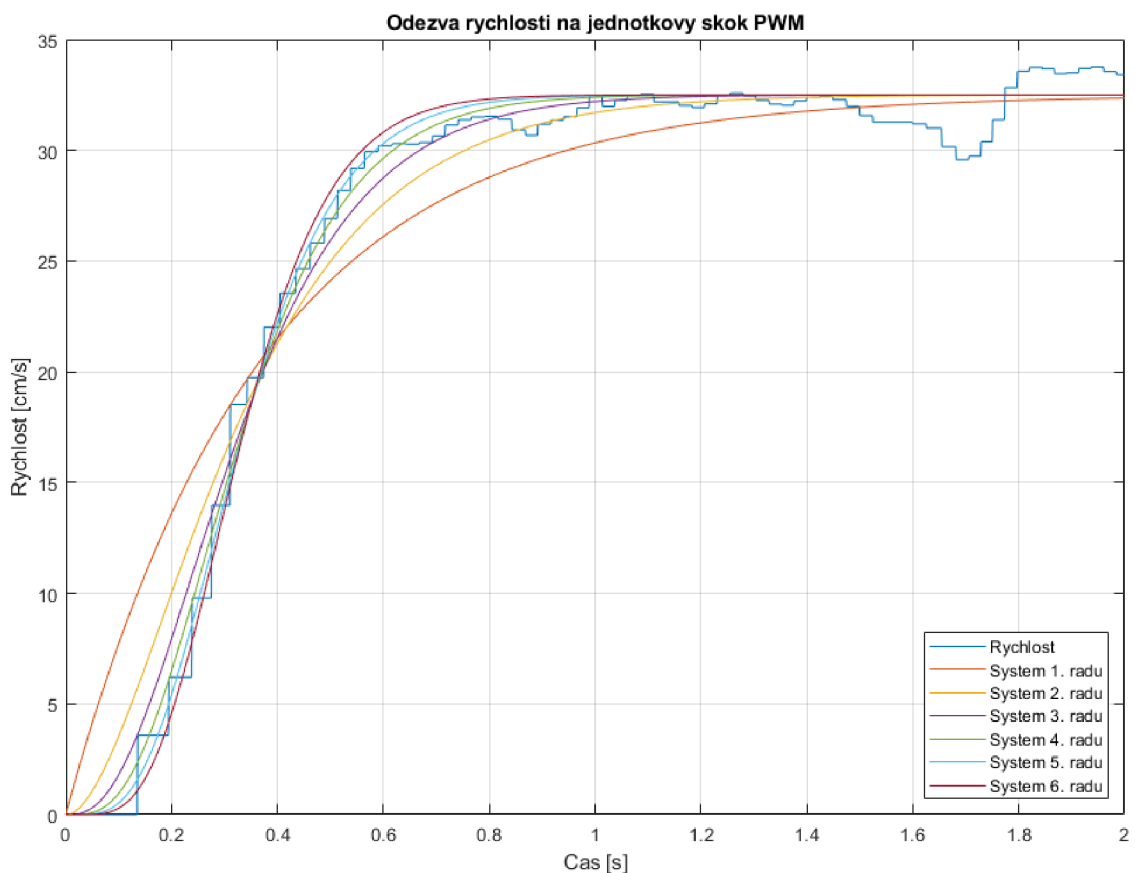
**Rovnice 5: Přenos soustavy  $n$ -tého řádu**

Následně jsem pro tento model pomocí funkce „fminsearch“ v Matlabu a funkce realizující kritérium metody nejmenších čtverců našel optimální hodnotu časové konstanty  $T$  pro každý řád  $n$  v rozsahu 1 až 6. Jako nejvhodnější průběh (nejnižší hodnota kritéria) se ukázal přenos soustavy 5. řádu (rovnice 6):

$$G_s = \frac{32,5}{(0,0692s + 1)^5}$$

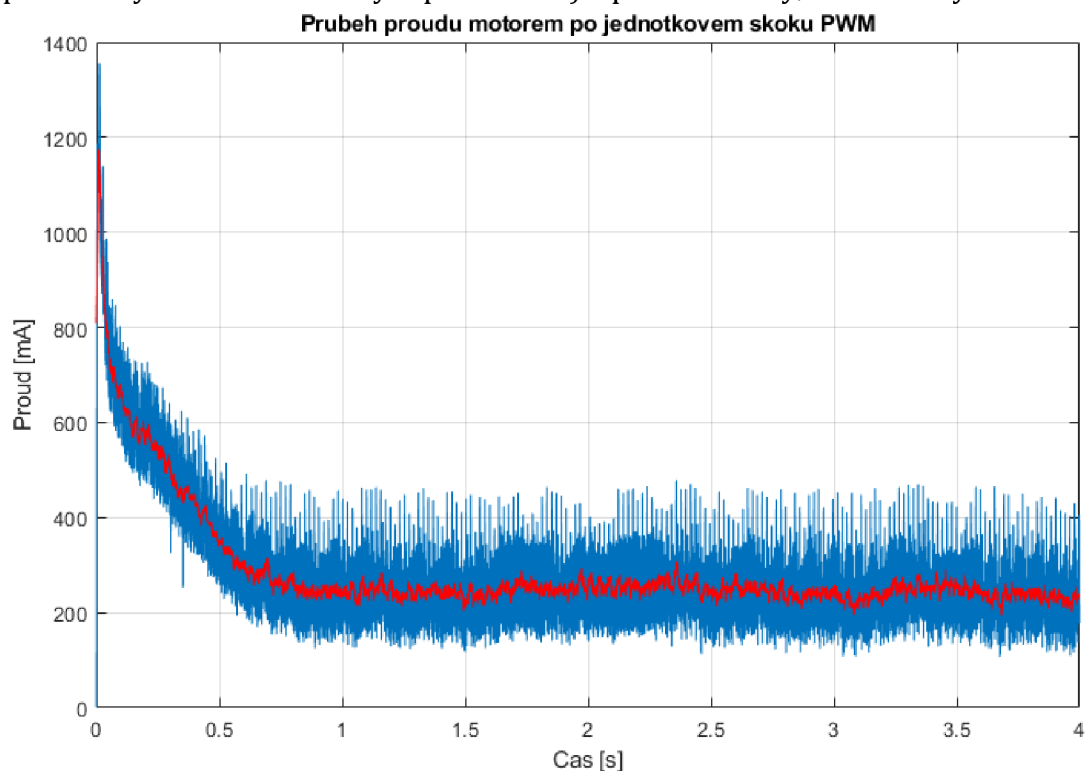
**Rovnice 6: Identifikovaný systém**

Na obrázku 35 je reálný naměřený průběh odezvy na jednotkový skok PWM spolu s aproximovanými průběhy:

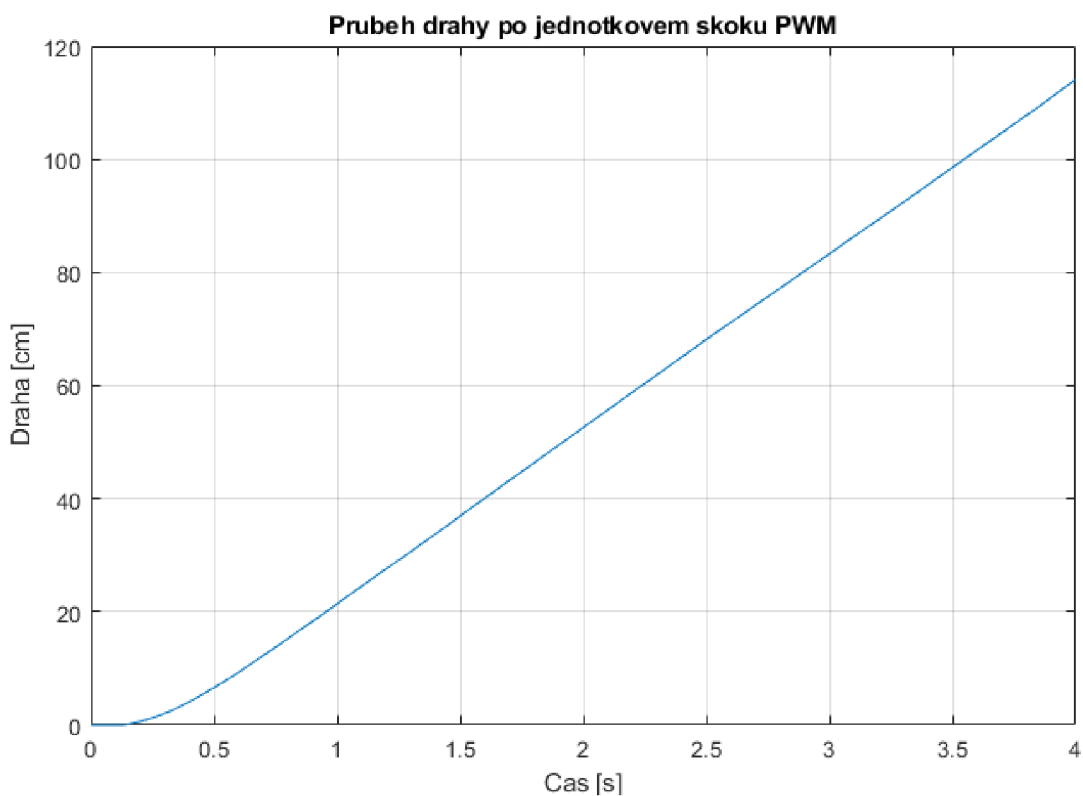


**Obrázek 35: Průběh rychlosti při jednotkovém skoku PWM a aproximace**

Při měření jednotkového skoku jsem také zjistil průběh proudu (ten bylo potřeba vyfiltrovat klouzavým průměrem) a průběh dráhy, viz obrázky 36 a 37:



Obrázek 36: Průběh proudu při jednotkovém skoku PWM



Obrázek 37: Průběh dráhy při jednotkovém skoku PWM

## 8.2 Návrh regulátoru rychlosti

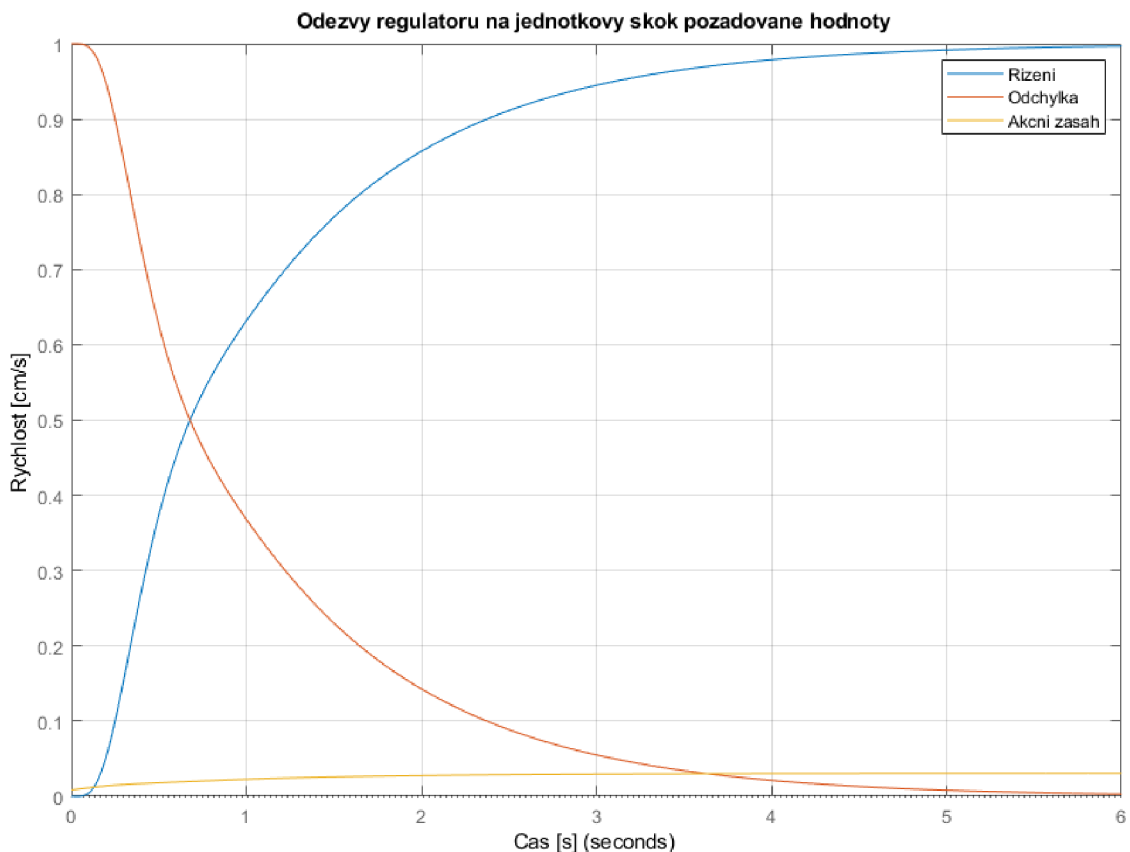
Hlavním požadavkem na regulátor je nepřekmitnutí výstupní hodnoty, jelikož zadaná rychlost je maximální.

Pro regulaci jsem zvolil regulátor typu PI. Ten jsem navrhl metodou integrálních kritérií (v tomto případě kvadratické kritérium vážené časem) v programu Matlab. Metoda funguje na stejném principu jako identifikace soustavy v kapitole 8.1.2 pomocí funkce „fminsearch“ hledám takové zesílení K a čas T, pro které je hodnotu daného kritéria nejmenší. Výsledkem je regulátor PI s přenosem (rovnice 7):

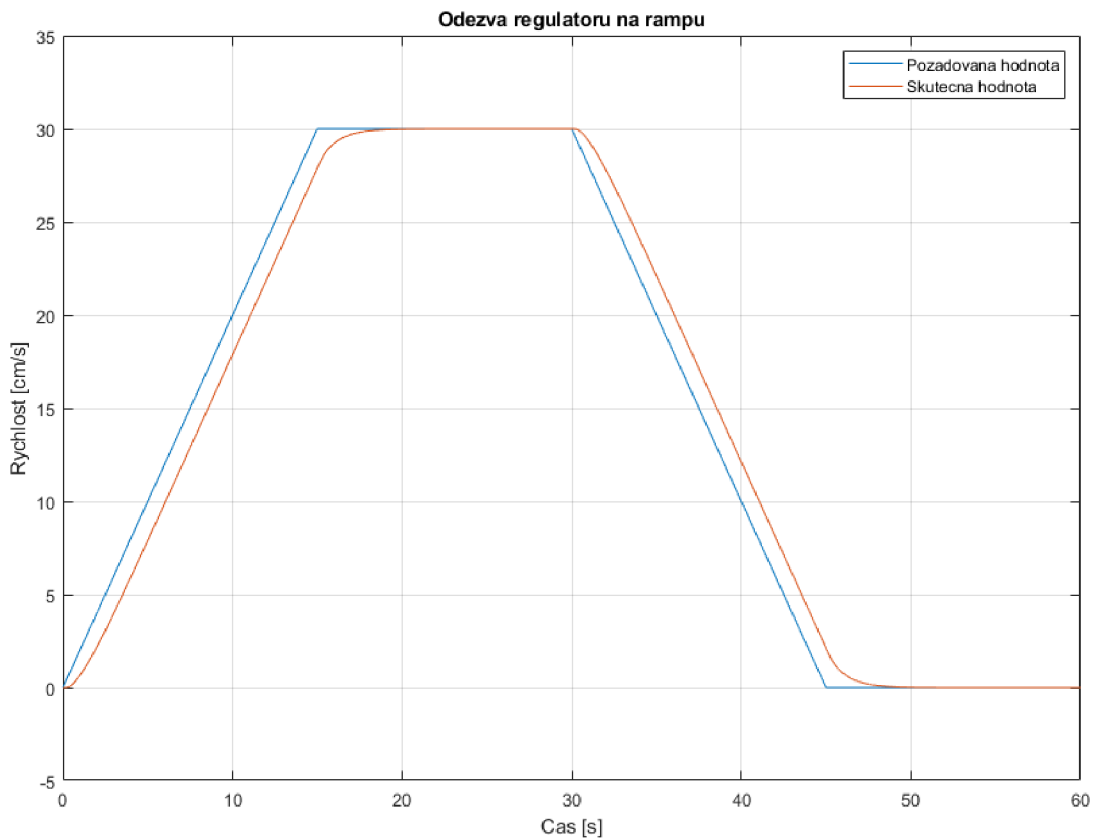
$$G_R = 0,02905 \times \frac{0,06921s + 1}{s}$$

Rovnice 7: Přenos navrženého PI regulátoru

Takto navržený regulátor nepřekmitne a plně vyreguluje jednotkový skok požadované hodnoty za čas blízký 5 vteřinám. Průběh odezvy na jednotkový skok, a na rampu požadované hodnoty je vidět na obrázku 38 a 39:



Obrázek 38: Odezva navrženého regulátoru na jednotkový skok požadované hodnoty



**Obrázek 39: Odezva navrženého regulátoru na rampu požadované hodnoty**

Pro použití v mikrokontroléru bylo třeba regulátor diskretizovat a vyjádřit jeho parametry  $K_p$  a  $K_i$ . Diskretizace přenosu je možná v programu Matlab funkcí „c2d“ a následně lze získat i koeficienty pomocí „piddata“.

Periodu vzorkování jsem zvolil  $T_{\text{sample}}=1\text{ms}$ , výsledné koeficienty pak jsou  $K_p=0,0507153$  a  $K_i=0,101688$ .

### 8.3 Regulace ujeté dráhy a rychlostní rampy

Dráha, kterou model již urazil se počítá jako součet částí dráhy, které vlak urazil za vzorkovací periodu regulátoru. Tato jedna část dráhy se vypočítá jednoduše ze znalosti délky časového úseku a jemu odpovídající aktuální rychlosti. Matematicky lze dráhu ujetou za  $n$  period vyjádřit sumou (viz rovnice 8):

$$s_n = \sum_{i=0}^n v_i \times T$$

**Rovnice 8: Výpočet ujeté vzdálenosti**

Kde  $s_n$  je výsledná dráha [cm],  $v_i$  rychlost v časovém úseku  $i$  [cm/s] a  $T$  je perioda regulátoru [s]. Symbol  $i$  značí index časového úseku od zahájení rampy.

Pro omezení prokluzu kol modelu se používají rychlostní rampy. Maximální zrychlení jsem stanovil na  $5\text{cm/s}^2$ , jako kompromis mezi prokluzováním kol a pomalým startem. Po spuštění regulace začne požadovaná rychlost stoupat po rampě s výše zmíněným zrychlením (aktuální požadovaná rychlost v časovém úseku  $i$  se spočítá podle rovnice 9).

$$v_i = 5 \times T \times i$$

**Rovnice 9: Výpočet aktuálně požadované rychlosti pro náběžnou rampu**

Stoupání se ukončí buď dosažením maximální nastavené rychlosti, nebo pokud zbývá urazit dráhu o délce brzdě rampy. Brzdění probíhá se stejným zrychlením (zde spíše zpomalením) jako náběžná rampa. Aktuální požadovanou rychlost na brzdě rampě je možné spočítat podle rovnice 10:

$$v_i = v_{TOP} - 5 \times T \times i$$

**Rovnice 10: Výpočet aktuálně požadované rychlosti pro sestupnou rampu**

Kde symbol  $v_{TOP}$  značí rychlost, ze které brzdím [cm/s].

Potřebnou dráhu pro zastavení lze spočítat jako obsah pravoúhlého trojúhelníku pod brzdě rampu, jelikož směrnice přepony trojúhelníku odpovídá zpomalení „ $a$ “ a jedna odvěsna odpovídá času potřebnému pro zastavení. Tento čas se spočítá jako podíl rychlosti  $v_{TOP}$  a zpomalení  $a$ , viz rovnice 11:

$$t_{brzdny} = v_{TOP} / a$$

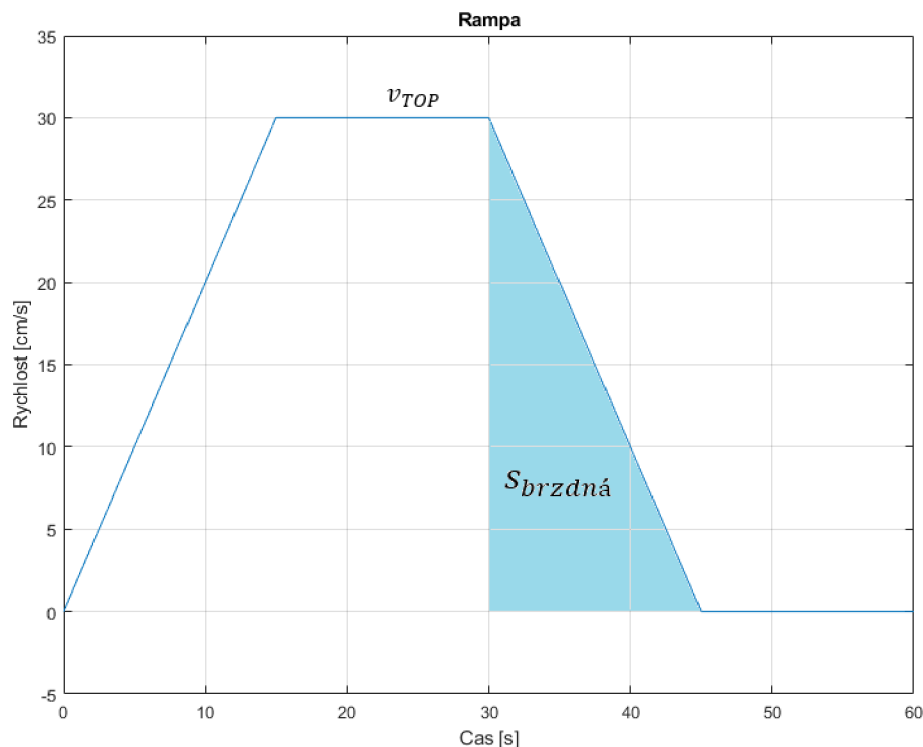
**Rovnice 11: Výpočet času potřebného pro zastavení**

Dosažením do zmíněného vztahu pak dostaneme tvar rovnice 12:

$$s_{brzdná} = \frac{1}{2} \times v_{TOP} \times \frac{v_{TOP}}{a} = \frac{v_{TOP}^2}{2 \times a}$$

**Rovnice 12: Výpočet potřebné brzdě dráhy**

Pro lepší představu viz obrázek 40.



Obrázek 40: Průběh brzdné rampy

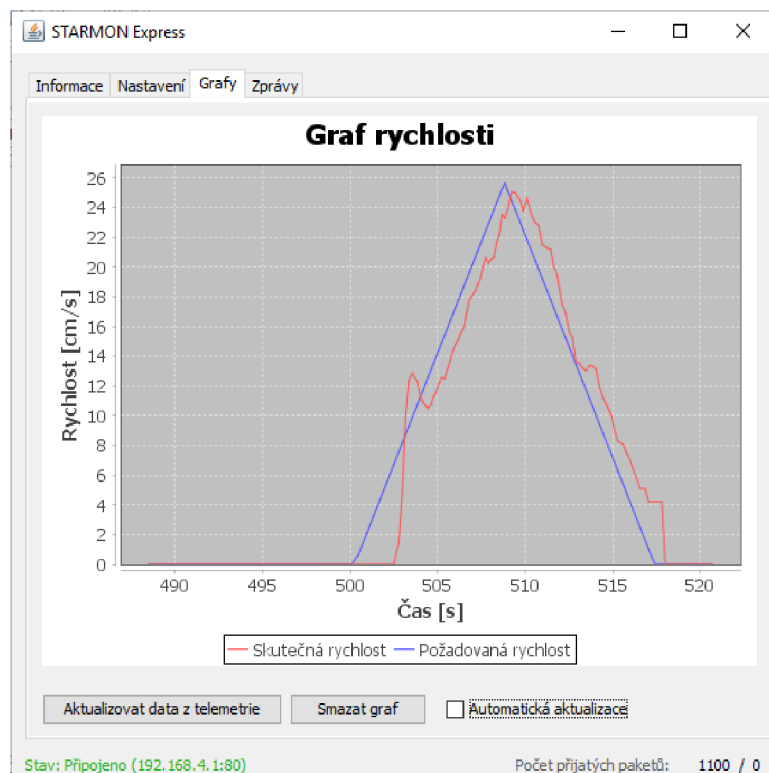
## 8.4 Výsledné průběhy

Po návrhu regulátoru jsem jej otestoval na reálné soustavě. Výsledky jsou uspokojivé. Regulátor je schopen udržet požadovanou rychlost s přesností  $\pm 1$  cm/s, což je vzhledem k přesnosti a umístění enkodéru (vhodnější by byla přímo hřídel motoru, ale to zde není možné, viz kapitola 6.5 Odometrie a 7.3.2 Problémy při měření) dobrý výsledek.

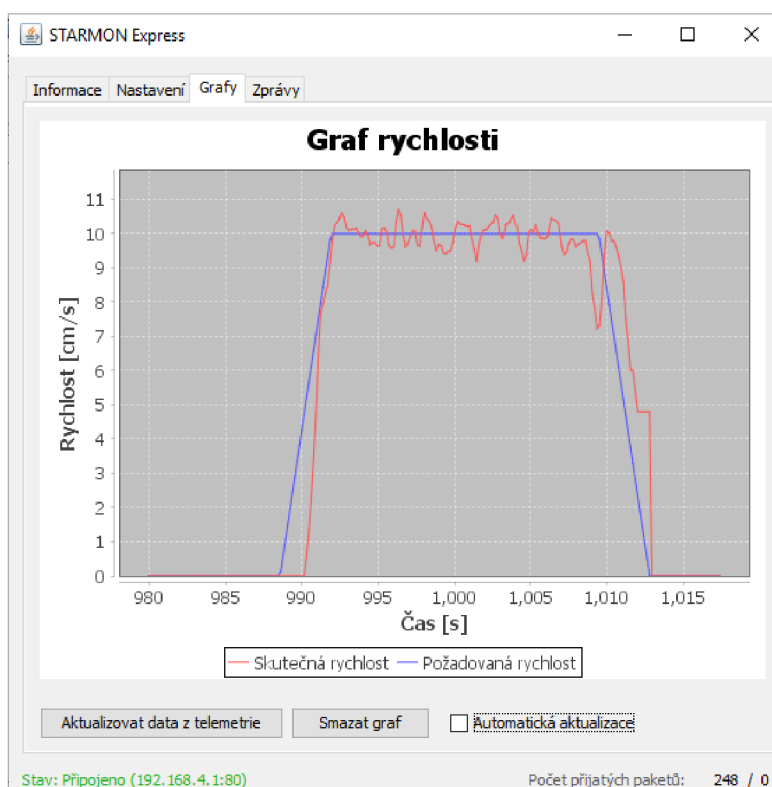
Při nižších rychlostech jízdy (10 cm/s a méně) jsou v grafu patrné špičky. S nižší rychlostí také klesá frekvence získávání údajů o rychlosti a více se projevují chyby.

Doba, za kterou je regulátor schopný vyregulovat odchylku je příliš dlouhá pro přesnější sledování změn požadované rychlosti, avšak pro praktické použití pro rampu v modelu vyhovuje. Návrh regulátoru pomocí sofistikovanějších metod integrovaných v programu Matlab by vedl na rychlejší regulaci.

Průběhy jsou na obrázku 41 a 42.



Obrázek 41: Průběh rychlosti modelu (1)



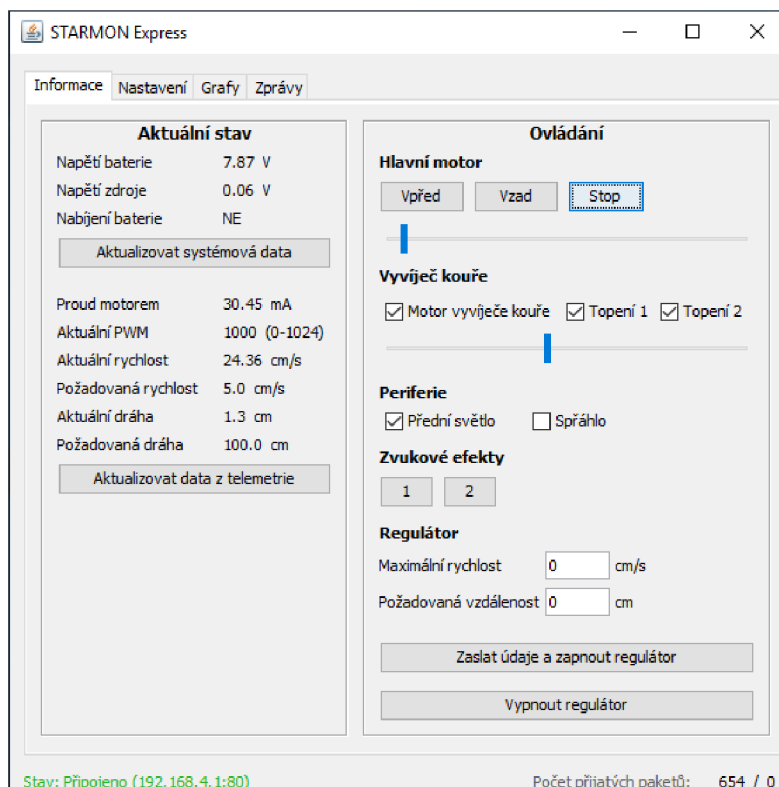
Obrázek 42: Průběh rychlosti modelu (2)

## 9 OVLÁDACÍ SOFTWARE PRO PC

Program umožňuje ovládat všechny funkce lokomotivy, včetně navržených regulátorů. Po spuštění aplikace dojde k automatickému navázání komunikačního kanálu přes TCP/IP s modulem lokomotivy. Pak je aplikace připravena na zadávání příkazů.

Aplikace je napsána v jazyce Java s použitím prostředí NetBeans a jeho grafického rozhraní pro rozmístění grafických prvků aplikace. Software se po spuštění rozdělí na dvě vlákna, kdy první obsluhuje uživatelské rozhraní a druhé na pozadí zpracovává odpovědi od modulu lokomotivy. Grafické rozhraní aplikace obsahuje také graf, který vykresluje pomocí volně dostupné knihovny JFreeChart.

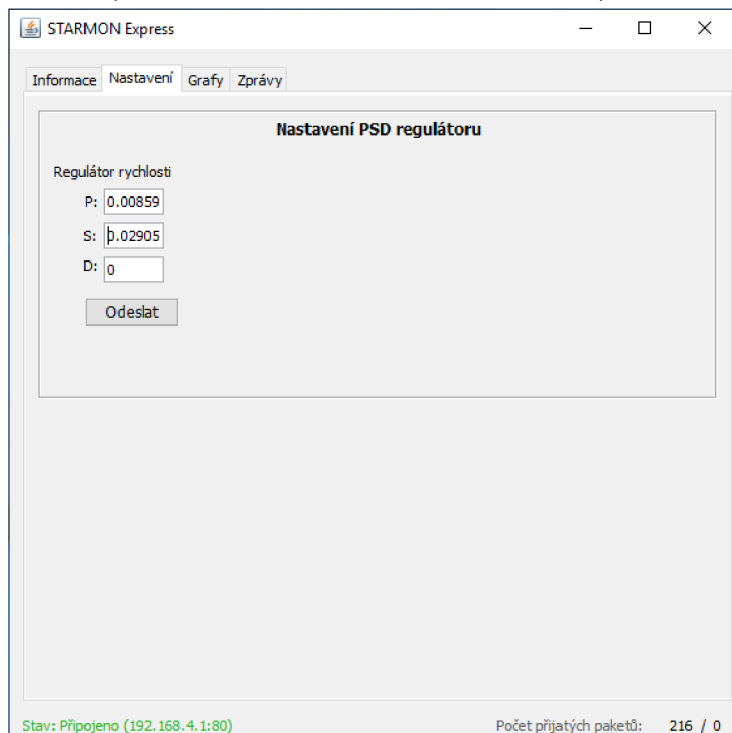
Grafické rozhraní se skládá celkem ze čtyř oddílů. Z prvního oddílu je možné ovládat nejdůležitější funkce lokomotivy, tedy aktivovat automatickou jízdu lokomotivy s nastavením maximální rychlosti a požadované ujeté dráhy. Také se zde zobrazuje aktuální stav lokomotivy, jako je napětí všech zdrojů, nabíjení, rychlost, plnění PWM a další, viz obrázek 43. Dále je možné ručně ovládat periferie, aktivovat zvukové efekty a nastavovat směr jízdy a plnění PWM motorů.



Obrázek 43: PC Aplikace – stránka s informacemi

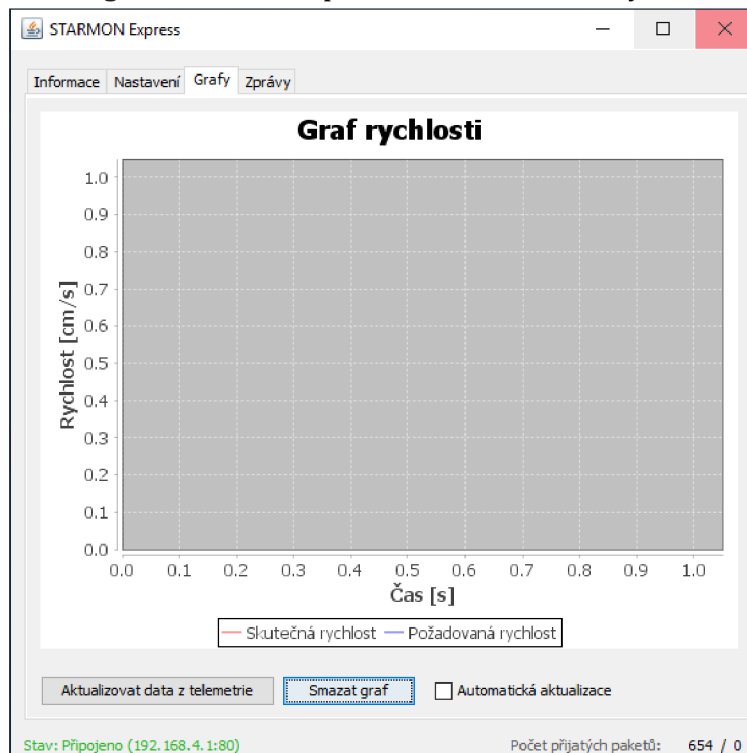


V druhém oddílu je možné ladit parametry regulátoru, což bylo velmi důležité hlavně ve fázi jeho testování a ladění. Tento oddíl je na obrázku 44.



Obrázek 44: PC Aplikace – nastavení regulátoru

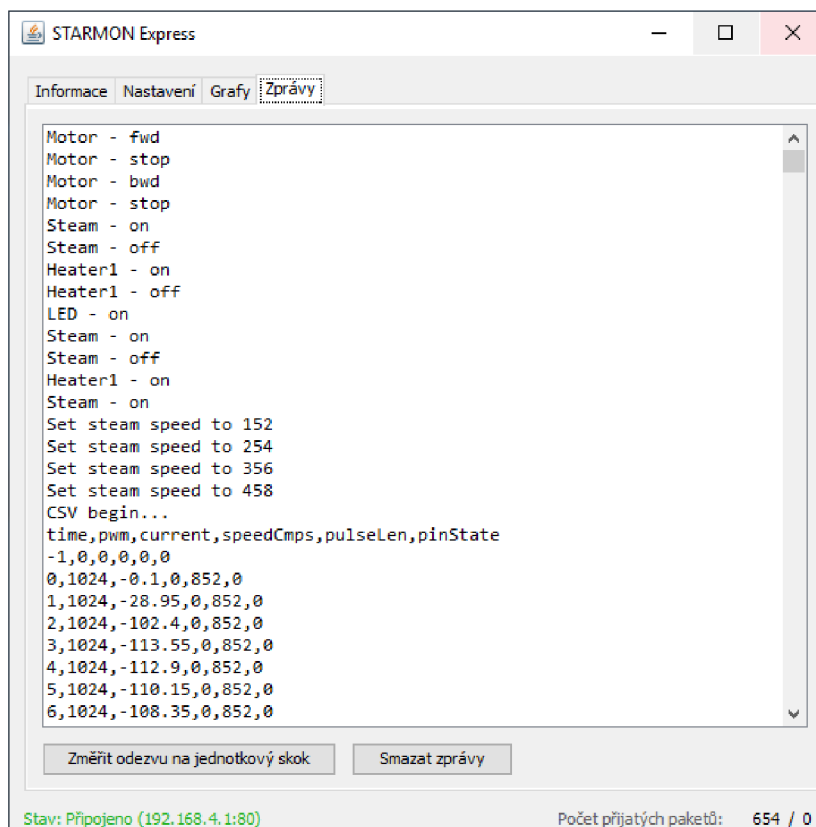
K zobrazení průběhů rychlosti slouží třetí část, kde se při povolení odeslání telemetrie vynáší do grafu aktuální a požadovaná hodnota rychlosti (obrázek 45).



Obrázek 45: PC Aplikace – vyobrazení grafu

Na poslední straně je možné zjistit odpovědi lokomotivy na zaslané příkazy a také poslat povel pro změření odezvy na jednotkový skok PWM, kdy se lokomotiva rozjede na 4 vteřiny dopředu a po zastavení začne posílat data ve formátu CSV pro následnou analýzu v programu Matlab nebo jemu podobných. Viz obrázek 46.

Zdrojové kódy aplikace jsou dostupné v příloze 3.



Obrázek 46: PC Aplikace – zprávy

## 10 MOBILNÍ APLIKACE

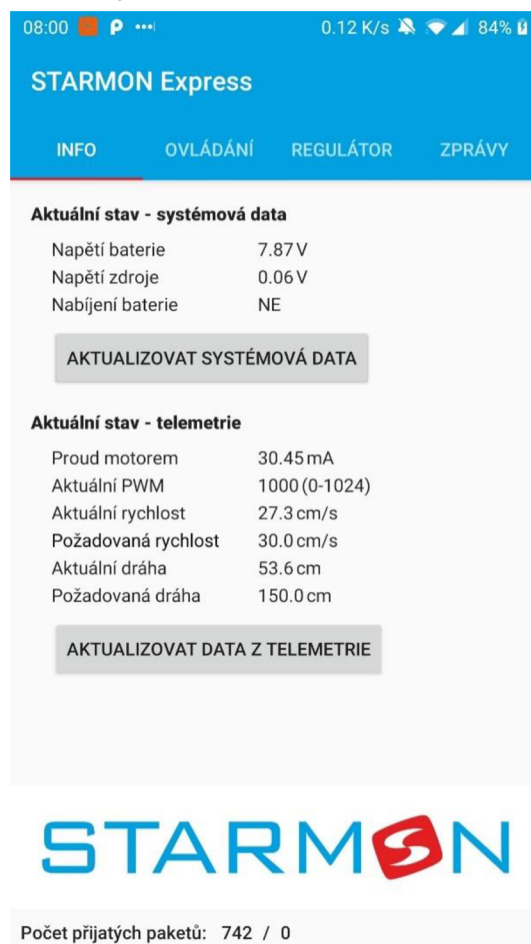
Aplikace pro operační systém Android umožňuje ovládat všechny hlavní funkce modelu. Po spuštění automaticky naváže spojení TCP/IP s modelem a poté je připravena na zadávání příkazů uživatelem.

Aplikace je napsána v jazyce Java, s použitím volně dostupného vývojového prostředí Android Studio. Po zapnutí se software rozdělí na dvě vlákna, kdy jedno obsluhuje grafické rozhraní a druhé zpracovává přijatá data z modelu.

Grafické rozhraní sestává podobně jako u aplikace pro počítač ze čtyř částí. Na první straně se zobrazují systémové informace modelu a telemetrie, viz obrázek 47. Druhá umožňuje manuální ovládání (obrázek 48).



Obrázek 47: Android aplikace – ovládání



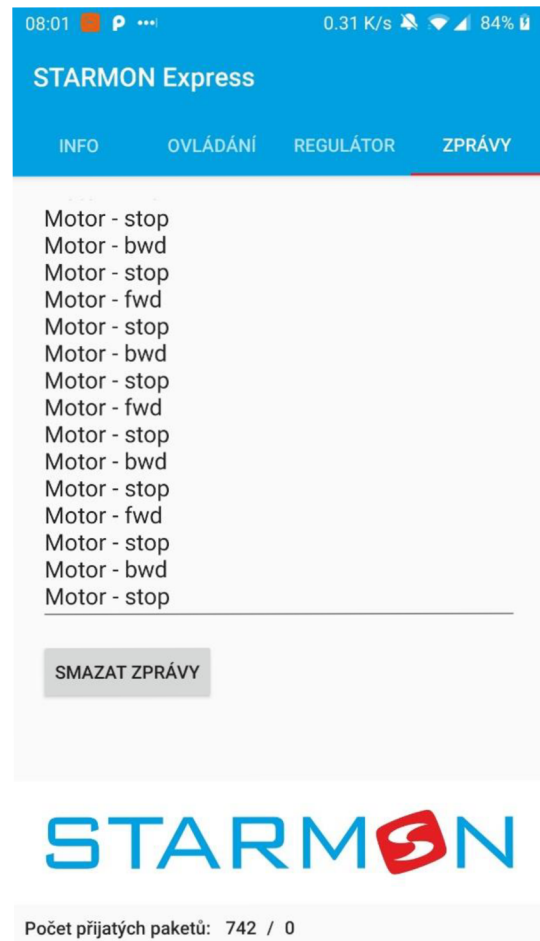
Obrázek 48: Android aplikace – informace

Na záložce „regulátor“ je možné nastavit a spustit automatickou regulaci rychlosti a dráhy. Poslední oddíl zobrazuje odpovědi na příkazy. (viz obrázek 49 a obrázek 50).

Zdrojové kódy aplikace jsou dostupné v příloze 4.



Obrázek 49: Android aplikace – automatické řízení



Obrázek 50: Android aplikace – zprávy

## 11 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem navrhl řídicí modul první části demonstrátoru zabezpečovacích zařízení firmy STARMON – modelu lokomotivy. Navrhl jsem schéma zapojení, realizoval desku plošných spojů, identifikoval řízenou soustavu a navrhl regulátor. Dále jsem napsal firmware pro mikrokontrolér řídicího modulu a ovládací aplikace pro PC a mobilní systém Android.

Navržený hardware je možné napájet přímo z kolejiště stejnosměrným nebo střídavým napětím do 12V. Pro použití s neelektrifikovaným kolejištěm je k dispozici zálohování pomocí Li-Ion akumulátoru v zapojení 2S, včetně jeho nabíjení z hlavního zdroje z kolejiště. Modul je schopen komunikace pomocí IR spojení nebo přes WiFi, plynulého ovládní rychlosti jak hlavního motoru, tak motoru generátoru kouře. Zapojení je také schopné měřit proud procházející hlavním motorem. To by se mohlo v případě potřeby využít pro regulaci momentu při rozjezdu. Externí periferie a budoucí rozšíření je možné díky připraveným tranzistory posíleným výstupům a rozšiřujícímu konektoru, na kterém jsou k dispozici všechny důležité sběrnice (I2C, UART, SPI), analogové vstupy i napájení. Pomocí integrovaného reproduktoru je možné přehrávat staniční hlášení a další zvuky, pro které jsem připravil externí FLASH paměť o kapacitě 4MB.

Regulovanou soustavu jsem identifikoval pomocí odezvy na jednotkový skok a metody nejmenších čtverců. Celý tento proces realizuje skript v programu Matlab. Skript nejprve porovnává odezvy systémů různých řádů s naměřeným průběhem a následně určí řád a časovou konstantu, která nejlépe odpovídá naměřeným údajům. Výsledek identifikace se jeví jako poměrně přesný, jak bylo ukázáno na grafu v kapitole 8.1.2.

Regulátor rychlosti byl navržen metodou integrálních kritérií, konkrétně jsem použil kvadratické kritérium vážené časem. Ze všech integrálních kritérií, která jsem vyzkoušel, má toto nejlepší průběh regulace. Za čas kratší než 2,5s dosáhne 90% požadované hodnoty a při regulaci nepřekmitne. V reálné implementaci na regulované soustavě se ukázalo, že tato doba regulace spolu s nepřesnostmi v měření rychlosti (zastavení kola vlivem nerovnosti, spojů kolejí, některé kolejevými oblouky, dopravní zpoždění vlivem klouzavého průměru) a snižováním požadované rychlosti (tím se sníží také frekvence aktualizace údajů o rychlosti) vede k nepřesné regulaci. I tak se mi podařilo regulovat rychlost s maximálními výkyvy do  $\pm 1\text{cm/s}$  při požadované rychlosti nad  $10\text{cm/s}$ . Realizoval jsem také rychlostní rampy, které by měly pomoci s plynulým rozjezdem a zastavením lokomotivy. Při rozjezdu se opět projevuje dlouhá doba regulace, ale i tak je tvar rampy přijatelný a brzdná rampa téměř odpovídá rampě požadované. Lepšího výsledku by bylo možné dosáhnout návrhem regulátoru pomocí sofistikovanějších

metod, které jsou implementovány v programu Matlab, avšak pro použití v modelu je navržený regulátor dostatečný.

Pro ovládání modelu je dostupný multiplatformní ovládací program pro PC a také mobilní aplikace pro systém Android. Programy jsou rozdělené do několika záložek. Na jedné z nich se uživateli přehledně zobrazuje kompletní telemetrie modelu, která obsahuje mimo jiné údaje o rychlosti, dráze, stavu externího zdroje a stav akumulátoru a jeho nabíjení. -Z další je možné manuálně ovládat všechny důležité funkce modelu, jako výkon motorů a směr jízdy, spřáhlo, světla a efekty. Automatické řízení lze také spustit z aplikací, a to po zadání maximální rychlosti a požadované dráhy. Pro identifikaci soustavy jsem přidal funkci měření odezvy na jednotkový skok PWM, kdy program od modelu přijme výpis dat ve formátu CSV pro další zpracování uživatelem. Aplikace pro počítač navíc obsahuje možnost vizualizace aktuální a požadované rychlosti v grafu.

V dalším vývoji nad rámec bakalářské práce je možné implementovat čtení IR balz a komunikaci s nadřazeným řídicím systémem.

# LITERATURA

- [1] Šablona pro BP/DP a prezentace v2.63 [online]. Brno: FEKT VUT, 2017 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://latex.feec.vutbr.cz/sablona/>
- [2] Železniční zabezpečovací zařízení. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD\\_zabezpe%C4%8Dovac%C3%AD\\_za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_zabezpe%C4%8Dovac%C3%AD_za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD)
- [3] European Train Control System. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_Train\\_Control\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/European_Train_Control_System)
- [4] Eurobalise. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Eurobalise>
- [5] Obrázek – Eurobalíza, Antti Leppänen [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Eurobalise#/media/File:Balises\\_in\\_Finland.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Eurobalise#/media/File:Balises_in_Finland.jpg)
- [6] Dokumentace PNS-03. *STARMON* [interní firemní literatura]. 2018 [cit. 2019-05-02].
- [7] CHUDÁČEK, V. a kol. Detekce kolejových vozidel v železniční zabezpečovací technice. 2. doplň. vyd. Praha: VÚŽ, 2005 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: [http://zabzar.cz/sites/default/files/KO\\_n.pdf](http://zabzar.cz/sites/default/files/KO_n.pdf)
- [8] Kolejový obvod. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kolejov%C3%BD\\_obvod](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kolejov%C3%BD_obvod)
- [9] Dokumentace SIRIUS STARMON. *STARMON* [interní firemní literatura]. 2018 [cit. 2019-01-04].
- [10] Archiv firmy. *STARMON* [interní firemní literatura]. 2018 [cit. 2019-05-02].
- [11] KŘÍŽ, Vlastimil. *Technické vybavení mobilních robotů* [online]. 2014 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: [http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/prednasky/2014\\_MRBT\\_04A\\_Technicke\\_vybaveni\\_mobilnich\\_robotu.pptx](http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/prednasky/2014_MRBT_04A_Technicke_vybaveni_mobilnich_robotu.pptx)
- [12] AN905: Brushed DC Motor Fundamentals. *Microchip Technology* [online]. 2004 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00905a.pdf>
- [13] STM32F407VG. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f407vg.html>

- [14] STM32F407VG Datasheet. *STMicroelectronics* [online]. 2016 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f407vg.pdf>
- [15] RM0090 Reference manual. *STMicroelectronics* [online]. 2018 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf)
- [16] MAX14870 Motor Driver. *Maxim Integrated* [online]. 2019 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: [https://www.maximintegrated.com/en/products/power/motor-driver-ics/MAX14870.html/tb\\_tab0](https://www.maximintegrated.com/en/products/power/motor-driver-ics/MAX14870.html/tb_tab0)
- [17] MAX14870/MAX14872 Datasheet. *Maxim Integrated* [online]. 2017 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX14870-MAX14872.pdf>
- [18] Výrobní dokumentace zdroje Z12. *STARMON* [interní firemní literatura]. 2018 [cit. 2019-01-04].
- [19] INA219 Datasheet. *Texas Instruments* [online]. 2015 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>
- [20] Obrázek – Modul ESP-07, *Arduino-shop.cz* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/arduino/1455-esp8266-wifi-modul-esp-07-bezdratovy-1478175998.html>
- [21] *ESP-01/07/12 Series Modules User's Manual: Version 1.1* [online]. 2017 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: [http://wiki.ai-thinker.com/media/esp8266/esp8266\\_series\\_modules\\_user\\_manual\\_v1.1.pdf](http://wiki.ai-thinker.com/media/esp8266/esp8266_series_modules_user_manual_v1.1.pdf)
- [22] LM386 Datasheet. *Texas Instruments* [online]. 2017 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm386.pdf>
- [23] AT25DF321 Datasheet. *Adesto Technologies* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.adeptotech.com/wp-content/uploads/doc3686.pdf>
- [24] ULN2803A Datasheet. *Texas Instruments* [online]. 2017 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2803a.pdf>
- [25] LTC4002 Product Overview. *Analog Devices* [online]. 2019 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ltc4002.html#product-overview>
- [26] LTC4002 Datasheet. *Analog Devices* [online]. 2003 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4002f.pdf>



- [27] VŠB – TUO. Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/Identifikace/str/metody.htm>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Zdrojové soubory navržených DPS na CD

Příloha 2: Výrobní podklady ve formátu Gerber na CD

Příloha 3: Zdrojové kódy firmware na CD

Příloha 4: Zdrojové kódy aplikací na CD