

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTRONIKY A INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kolové robotické platformy pro výuku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš MATHAUSER**
Osobní číslo: **E18B0021P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Kolové robotické platformy pro výuku**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

Navrhněte funkční řešení elektroniky pro kolové podvozky dostupné na KAE

1. Vyberte vhodný mikrokontrolér a budiče pro motory a příp. serva
2. Vytvořte vzorové aplikace pro řízení vozidla
3. Navrhněte vhodné senzory použitelné pro algoritmy autonomního řízení

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Mikroprocesory a mikropočítače / Jiří Pinker. – 1. vyd. – Praha : BEN – technická literatura, 2004. – 159 s. : il. – ISBN 80-7300-110-1
2. Yiu, Joseph. The Definitive Guide to ARM? Cortex?-M3 and Cortex?-M4 Processors, Elsevier Science & Technology, 2013.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Weissar, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Práce se zabývá elektrickou částí kolových podvozků dostupných na Katedře elektroniky a informačních technologií. Nejprve jsou shrnuty informace o použitých motorech, budičích, senzorech a mikrokontroléru. Následně jsou vytvořeny inicializační a řídicí funkce pro jednotlivé budiče a demo programy demonstrující funkci podvozků. V závěru jsou popsány možnosti dalšího rozšíření stávajících podvozků.

Klíčová slova

H-můstek, kolový podvozek, motorový budič, Nucleo STM32, PWM, stejnosměrný motor

Abstract

The thesis deals with the electrical part of wheeled chassis available at the Department of Electronics and Information Technology. Firstly, information about used motors, motor drivers, sensors and microcontroller is summarized. Subsequently, initialization and control functions are created for individual motor drivers as well as demo programs demonstrating the function of the chassis. In conclusion, the possibilities of further expansion of existing chassis are described.

Key words

H-bridge, wheeled chassis, motor driver, Nucleo STM32, PWM, DC motor

Prohlášení

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

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



.....

podpis

V Plzni dne 24.5.2021

Tomáš Mathauser

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Weissarovi, Ph.D. za cenné rady, náměty na vylepšení a poskytnutí hardwaru.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 HARDWARE	12
1.1 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY	12
1.1.1 <i>Princip funkce</i>	12
1.1.2 <i>Možnosti řízení</i>	13
1.1.3 <i>Typy použité v podvozcích</i>	15
1.2 BUDIČE PRO STEJNOSMĚRNÉ MOTORY	19
1.2.1 <i>Obecný princip H-můstku</i>	19
1.2.2 <i>X-NUCLEO-IHM04A1 (L6206)</i>	20
1.2.3 <i>ZUMO SHIELD (DRV8835)</i>	22
1.2.4 <i>Samostatný DRV8833</i>	23
1.2.5 <i>X-NUCLEO-IHM12A1 (STSPIN240)</i>	25
1.3 SENZORY.....	26
1.3.1 <i>LEGO</i>	26
1.3.2 <i>ZUMO</i>	28
1.4 VÝVOJOVÁ DESKA NUCLEO STM32 411RE	29
1.4.1 <i>GPIO (General Purpose Input/Output)</i>	30
1.4.2 <i>TIM2 to TIM5 (General-purpose timers)</i>	31
1.4.3 <i>ADC (Analog to Digital Converter)</i>	32
1.5 PODVOZKY DOSTUPNÉ NA KATEDŘE	33
1.5.1 <i>LEGO</i>	33
1.5.2 <i>Pololu ZUMO</i>	34
1.5.3 <i>Pásák</i>	35
1.5.4 <i>Kolový podvozek</i>	36
1.6 PŘÍKLADY KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH PODVOZKŮ	36
1.6.1 <i>Pololu 3Pi</i>	36
1.6.2 <i>Waveshare Alphanbot 2</i>	37
1.6.3 <i>MBot Codey Rocky</i>	38
2 SOFTWARE	39
2.1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ ATOLLIC TRUESTUDIO	39
2.2 FUNKCE PRO JEDNOTLIVÉ PODVOZKY	40
2.2.1 <i>Inicializační funkce motorů</i>	40
2.2.2 <i>Funkce pro řízení motorů</i>	42
2.3 DEMO PROGRAMY	44
2.3.1 <i>Jízda do čtverce</i>	44
2.3.2 <i>Jízda po čáře (line follower)</i>	45
3 NÁVRH BUDOUCÍCH ROZŠÍŘENÍ	46
3.1 SENZORY ČÁRY PRO PÁSÁKA A KOLOVÝ PODVOZEK	46
3.2 BEZDRÁTOVÉ ROZHRANÍ PRO LADĚNÍ PID REGULÁTORU.....	46

3.3 SNÍMÁNÍ OTÁČEK MOTORŮ	47
ZÁVĚR.....	50
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52
PŘÍLOHY	1

Úvod

Cílem této bakalářské práce je navržení funkčního řešení elektroniky pro podvozky dostupné na Katedře elektroniky a informačních technologií.

Na katedře je dostupné množství podvozků, ze kterých byli vybráni čtyři zástupci v podobě LEGO podvozku, pásáku postaveného ze stavebnice Merkur, kolového podvozku a komerčního řešení Pololu ZUMO. Z důvodu zvýšení rozmanitosti práce je ke každému podvozku vybrán jiný typ budiče, který svojí specifikací odpovídá motorům použitým v daném podvozku. Na pozici mikrokontroléru je použita u všech podvozků vývojová deska Nucleo STM32 411RE. Dále se práce věnuje řídicím funkcím podvozků a demo programům, které demonstrují jejich funkčnost. Poslední část je věnována návrhu možných rozšíření podvozků.

První část práce je věnována hardwaru. Nejprve je popsán obecný princip stejnosměrného motoru, způsoby jeho řízení a popis typů motorů použitých v jednotlivých podvozcích. Poté je věnována pozornost obecnému principu plného H-můstku, na jehož principu pracují všechny použité budiče. Tyto budiče jsou následně popsány v další části, zejména pak rozdílnosti časování řídicích signálů. Práce se poté zaměřuje na vývojovou desku Nucleo, popis periférií a jejich registrů využitých v práci. Následně je pozornost věnována dvěma typům senzorů čáry, kterými jsou osazeny podvozky LEGO a ZUMO. Poslední podkapitola popisuje podvozky použité v práci spolu s komerčně dostupnými alternativami.

Druhá část práce se věnuje softwaru. Nejprve je krátce zmíněna vývojová platforma Atollic TrueSTUDIO použitá pro vytvoření programů a poté je popsána konstrukce řídicích funkcí podvozků a demo programů.

V poslední části jsou popsány možnosti rozšíření stávajících podvozků v podobě bezdrátové komunikace a zejména vytvoření zpětné vazby od motorů pomocí enkodérů.

Seznam symbolů a zkratk

RPM	Otáčky za minutu
S1, S2, S3, S4	Spínače
PWM	Pulsně šířková modulace
GND	Zem
ADC	Analogově-digitální převodník
LED	Svítivá dioda
Shield.....	Rozšiřující deska
DC	Stejnoseměrné napětí/proud
IR.....	Infračervený
ARM.....	Architektura procesoru
SRAM.....	Volatilní paměť
EEPROM.....	Nevolatilní paměť
I/O.....	Vstupní/výstupní
HW	Hardware
EN/DIR.....	Logika řídicích signálů budiče
IN/IN	Logika řídicích signálů budiče
PID	Regulátor s proporcionální, integrační a derivační složkou
DPS.....	Deska plošného spoje
Jumper	Zkratovací propojka

1 HARDWARE

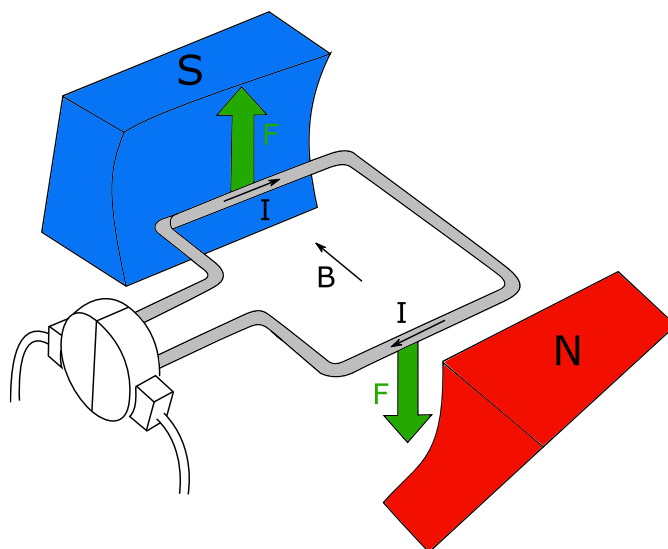
Tato kapitola se zabývá hardwarem, který je použitý v jednotlivých podvozcích. Jedná se o různé typy motorů, jejich budičů a o vlastní mechaniku podvozků. Základ každého podvozku tvoří vývojová deska Nucleo STM32411RE spřažená s daným budičem a motory. Nezbytnou součástí je také napájecí zdroj, který je tvořen čtveřicí, případně šesticí AA baterií.

1.1 Stejnosměrné motory

Motor obecně slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou. Stejnosměrné motory pak patří historicky k nejstarším elektrickým strojům. Mají výborné dynamické a regulační vlastnosti, jelikož lze snadno řídit jejich otáčky již od nulové hodnoty. Jejich využití v praxi ale klesá a díky rozvoji polovodičových součástek jsou nahrazovány asynchronními motory řízenými frekvenčním měničem. Výhoda asynchronních motorů spočívá v absenci komutátoru a kartáčů, z čehož vyplývá menší náročnost na údržbu. [1]

1.1.1 Princip funkce

Pro vysvětlení principu funkce stejnosměrného motoru je nejjednodušší ho uvést na příkladu smyčky rotující v homogenním magnetickém poli.



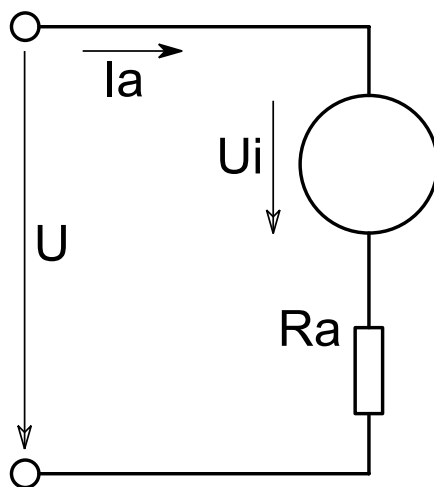
Obr. 1.1 Princip stejnosměrného motoru

Pokud je taková smyčka protékána proudem, tento proud indukuje magnetické pole se stejnou orientací jako vnější pole. Jelikož se souhlasné póly magnetů odpuzují, začne se smyčka (rotor) natáčet tak, aby se opačné póly statoru a rotoru co nejvíce přiblížily. Aby se motor otáčel dál, musí dojít ke změně směru proudu procházejícího smyčkou, díky čemuž dojde i ke změně pólů rotoru. Toto přepínání směru proudu má na starosti komutátor. [1]

Aby měl takovýto motor v praxi využitelné vlastnosti, obsahuje několik smyček a příslušný počet lamel komutátoru. Všechny motory použité v podvozcích využívají, kvůli nízkým výkonům, k vybuzení magnetického pole statoru permanentní magnety. Napětí je tedy přiváděno pouze na rotor skrze kartáče a lamely komutátoru.

1.1.2 Možnosti řízení

Aby bylo možné využít vlastnosti stejnosměrného motoru, je potřeba znát možnosti a odvodit způsoby řízení jeho otáček.



Obr. 1.2 Náhradní schéma stejnosměrného motoru

K tomu bude využit vztah (1.1) pro rychlost stejnosměrného motoru v motorickém režimu.
[1]

$$\omega = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k \cdot \Phi} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}], \quad (1.1)$$

kde:

U ... je napájecí napětí motoru [V]

R_a ... je proud vinutí motoru [Ω]

I_a ... je proud motorem [A]

k ... je konstrukční konstanta [-]

Φ ... je magnetický tok [Wb].

Z tohoto vztahu plynou možnosti řízení rychlosti stejnosměrného motoru:

1. Změnou magnetického toku – tento způsob nelze použít, jelikož jsou použity motory s permanentními magnety
2. Změnou velikosti odporu vinutí – lze pomocí předřadného odporu, což je energeticky nevýhodné
3. Změnou velikosti napájecího napětí

Poslední způsob lze velice snadno realizovat pomocí plného H-můstku řízeného PWM signálem. Navíc nabízí kromě řízení otáček i změnu směru otáčení. Proto je tento způsob použit ve všech popisovaných podvozcích.

1.1.3 Typy použité v podvozcích

LEGO

Prvním popisovaným motorem je motor 8883M od firmy LEGO z řady Power Functions. Je tedy součástí známé stavebnice LEGO. Veškeré informace o motoru jsou čerpány z webových stránek [2].



Obr. 1.3 LEGO motor (převzato z [3])

Jmenovité napětí motoru je 9 V a připojení je realizováno pomocí LEGO konektoru. Naprázdno dosahuje rychlosti 405 RPM při proudu 65 mA. Při nejvyšší účinnosti dosahuje rychlosti 275 RPM a točivého momentu 0,37 kg/cm při proudu 0,31 A. Točivý moment potřebný k zastavení motoru je 1,12 kg/cm při proudu 0,85 A.

Pro mechanický výstup je potřeba použít LEGO hřídel s křížovým tvarem.

ZUMO

Druhým popisovaným motorem je HP 6V 75:1 od firmy Pololu pocházející z rodiny mikromotorů Pololu. Všechny následující informace jsou čerpány z datasheetu výrobce dostupného na webových stránkách [4].



Obr. 1.4 Motor Pololu HP 6V 75:1 (převzato z [5])

Jedná se o kartáčový stejnosměrný mikromotor z řady High Power (HP) s nominálním napětím 6 V, maximálním výkonem 1,4 W a integrovanou převodovkou s převodovým poměrem 75:1.

Bez zátěže dosahuje rychlosti 410 RPM při proudu 70 mA. Ve stavu nejvyšší účinnosti pak dosahuje rychlosti 340 RPM a točivého momentu 0,23 kg/cm při proudu 0,34 A. Maximální točivý moment potřebný k zastavení motoru je pak 1,3 kg/cm při proudu 1,6 A.

Výstupní hřídel má tvar D, délku 9 mm a průměr 3 mm. Lze také získat verzi motoru s druhou hřídelí vystupující z opačné strany motoru. Takový motor lze doplnit o enkodér pro sledování pozice a otáček.

PÁSÁK

Třetím popisovaným motorem je GM37-3530-1250-30 od firmy TTMOTOR. Všechny následující informace jsou čerpány z webových stránek výrobce [6].



Obr. 1.5 Motor TTMOTOR GM37-3530-1250-30 (převzato z [7])

GM37-3530 je kartáčový stejnosměrný motor určený pro napětí 12 V disponující maximálním výkonem 1,8 W. Je spojený s převodovkou s převodovým poměrem 30:1.

Rychlost motoru bez zátěže je 165 RPM při proudu 45 mA. Jmenovité otáčky jsou 140 RPM s točivým momentem 0,8 kg/cm při proudu 320 mA. Točivý moment pro zastavení je 5 kg/cm při proudu 2 A.

KOLOVÝ PODVOZEK

Posledním popisovaným motorem je Pololu 1593. Všechny následující informace jsou čerpány z webových stránek výrobce [8].



Obr. 1.6 Motor Pololu 1593 (převzato z [8])

Jedná se o kartáčový stejnosměrný motor s jmenovitým napětím 4,5 V. Je spojený s plastovou převodovkou s převodovým poměrem 180:1. Převodovka je vybavena bezpečnostní spojkou, která rozepne při nadměrném točivém momentu (nad 2 kg/cm) a zabrání tak poškození plastových ozubených kol převodovky.

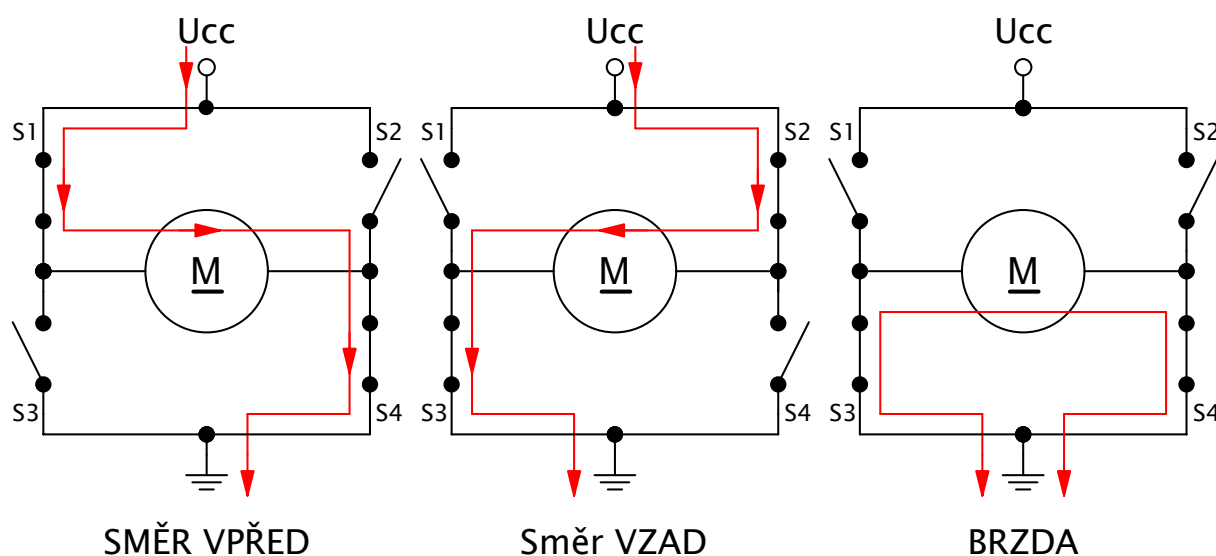
Otáčky naprázdno jsou 80 RPM při proudu 80 mA a točivý moment potřebný k zastavení je 2,2 kg/cm při 800 mA.

1.2 Budiče pro stejnosměrné motory

V této kapitole bude pojednáno o principu budičů stejnosměrných motorů a dále pak budou popsány rozdíly mezi jednotlivými budiči, kterými jsou podvozky osazeny.

1.2.1 Obecný princip H-můstku

Všechny použité budiče pracují na principu H-můstku. Plný H-můstek je složen ze čtyř spínacích prvků, které jsou uspořádány tak, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 1.7). Nejčastěji jsou k dostání jako integrované obvody obsahující dvojici plných H-můstků.



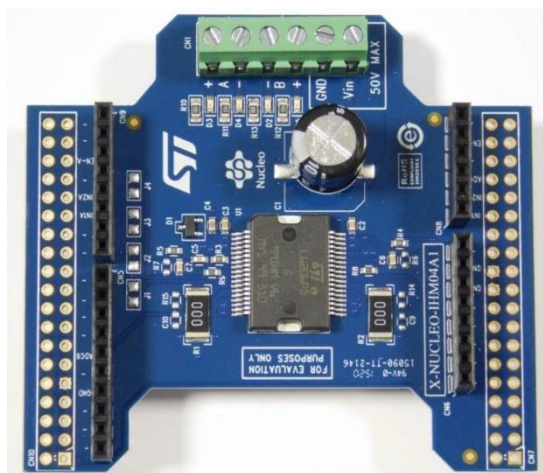
Obr. 1.7 Principiální schéma H-můstku

Nyní bude vysvětlen princip fungování pomocí zjednodušeného schématu na obrázku (Obr. 1.7), ve kterém je červeně vyznačen procházející proud. Horní dvojice spínačů (S1 a S2) je připojena k napájecímu napětí U_{cc} a spodní dvojice (S3 a S4) k zemi. V H-můstku nikdy nesmí dojít současně k sepnutí spínačů, které jsou pod sebou, tedy S1 a S3 nebo S2 a S4, jelikož by došlo ke zkratování napájecího zdroje. Pro řízení motoru se spínají dvojice spínačů, které jsou na diagonále (křížem). Pro otáčení motoru směrem vpřed se musí sepnout spínače S1 a S4. Proud tedy prochází od kladného pólu zdroje přes S1 do motoru a dále přes S4 do záporného pólu. Pro otáčení směrem vzad musí nejprve dojít k rozepnutí S1 a S4 a poté sepnutí S2 a S3. Proud poté prochází od kladného pólu zdroje přes S2 do motoru a přes S3 do záporného pólu zdroje. Další možností je brždění motoru. Toho je docíleno sepnutím spínače S3 a S4, čímž dojde ke zkratování motoru a jeho brždění. Ve skutečném obvodu jsou místo spínačů použity tranzistory.

Z předchozí kapitoly je známo, že otáčky stejnosměrného motoru jsou určeny velikostí napětí, které je na motor přivedeno. Pro snížení otáček je využit PWM signál, kterým jsou řízeny spínače, čímž dojde ke snížení střední hodnoty napětí na motoru.

1.2.2 X-NUCLEO-IHM04A1 (L6206)

Prvním popisovaným budičem je X-NUCLEO-IHM04A1 od firmy STMicroelectronics obsahující integrovaný obvod L6206. Následující informace jsou čerpány z dokumentace výrobce dostupné na webových stránkách [9, 10].



Obr. 1.8 Budič IHM04A1 (L6206) (převzato z [9])

Jedná se o rozšiřující modul (shield), který nabízí připojení pomocí Arduino konektorů, případně ST Morpho konektorů. S jeho pomocí lze řídit jeden až čtyři stejnosměrné motory v závislosti na zvoleném režimu provozu. Obsahuje ochranu proti přehřátí, podpětí a nadproudu.

Režimy provozu se volí konfigurací čtveřice zkratovacích propojek (jumperů) umístěných přímo na shieldu. Pro obousměrné řízení dvou motorů je potřeba zvolit režim MOD1, tedy bez jumperů. V tomto režimu je rozmezí napájecího napětí shieldu od 8 V do 50 V a maximální proud pro každý motor 2,8 A.

Připojení motoru a napájecího napětí je zajištěno šroubovacími svorkami s označením Vin a GND pro napájecí napětí a zem, A+ a A- pro motor A, B+ a B- pro motor B. Deska také obsahuje LED indukující stav jednotlivých výstupů pro motory, které jsou užitečné pro ladění programu.

Tab. 1.1 Pravdivostní tabulka budiče IHM04A1 (L6206)

EN _x	IN1 _x	IN2 _x	funkce
0	X	X	vysoko-impedanční stav
1	0	0	brzda (GND)
1	1	0	jízda vpřed
1	0	1	jízda vzad
1	1	1	brzda (U _{cc})

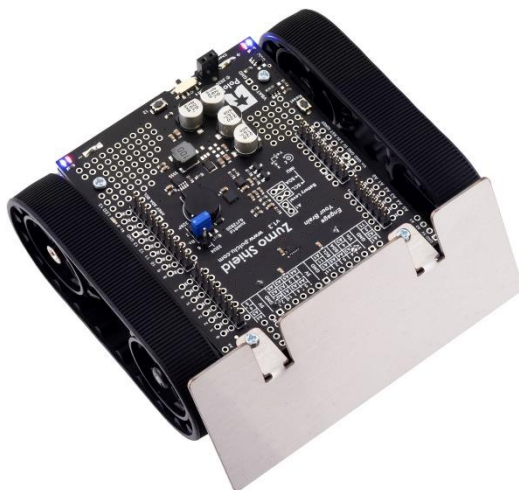
Pro ovládání motorů je použita logika IN/IN, celkem tedy šest řídicích signálů označených ENA, IN1A, IN2A pro ovládání motoru A a ENB, IN1B, IN2B pro ovládání motoru B. Signál EN_x má význam enable, slouží tedy k povolení daného motoru. Pokud je v logické 0, výstup pro motor není povolen a hodnoty na vstupech IN1_x a IN2_x jsou ignorovány. V případě logické 1 na vstupu EN_x dojde k povolení daného výstupu a k řízení jsou využity signály IN1_x a IN2_x.

Signál IN_x v logické 1 znamená připojení výstupu k napájecímu napětí U_{cc}, v logické 0 pak k zemi. Pro otáčení např. motorem A v jednom směru je přivedena na IN1A logická 1 a na IN2A logická 0, opačný směr otáčení je zajištěn prohozením signálů, tedy IN1A = logická 0 a IN2A = logická 1. Pro regulaci otáček je nahrazen signál logická 1 PWM signálem s maximální frekvencí 100 kHz.

Další dva signály, které shield poskytuje, jsou ADC6, který slouží k měření proudu do motoru A a ADC4, který je určen ke stejnému účelu u motoru B.

1.2.3 ZUMO SHIELD (DRV8835)

Druhým popisovaným budičem je DRV8835 od firmy Pololu, který je součástí ZUMO shieldu. Následující informace jsou čerpány z dokumentace výrobce dostupné na webových stránkách [11, 12].



Obr. 1.9 Podvozek ZUMO obsahující budič DRV8835 (převzato z [11])

Tento shield je součástí komerčního řešení podvozku ZUMO od firmy Pololu. Budič je v tomto případě integrovaný do desky samotného shieldu, lze ho ale koupit i jako samostatný modul. Následující popis tedy platí jak pro ZUMO shield, tak i pro samostatný modul. Shield lze připojit k vývojové desce pomocí Arduino konektorů nebo ST Morpho konektorů.

Budič DRV8835 lze použít pro řízení dvou DC motorů, nebo jednoho krokového motoru. Napájecí napětí je v rozsahu od 0 do 11 V. Maximální proud dodávaný do každého motoru je 1,2 A trvale a až 1,5 A špičkově. V budiči je integrována ochrana proti přepólování, podpětí, nadproudu a přehřátí.

Tab. 1.II Pravdivostní tabulka budiče DRV8835

EN	DIR	funkce
0	X	brzda
1	0	jízda vpřed
1	1	jízda vzad

Pro řízení motorů je použita logika EN/DIR. Signál DIR, v překladu směr (někdy označovaný PHASE) slouží ke zvolení směru otáčení motoru. Při logické 0 se točí jedním směrem, při logické 1 směrem opačným. Druhý signál ENABLE, v překladu povolení, povoluje

otáčení motoru. Při logické 0 motor stojí a při logické 1 se otáčí plnými otáčkami. Pro regulaci otáček je přiveden na vstup EN signál PWM o maximálním kmitočtu 250 kHz.

1.2.4 Samostatný DRV8833

Třetím popisovaným budičem je DRV8833 od firmy Pololu. Již podle označení je patrné, že pochází ze stejné rodiny jako DRV8835 popsany v předchozí kapitole. Následující informace jsou čerpány z dokumentace výrobce dostupné na webových stránkách [13].

Jako jediný budič v této práci je DRV8833 použit jako samostatný modul, který neposkytuje připojení přes Arduino nebo ST Morpho konektory. Jeho propojení s vývojovou deskou je realizováno vsazením budiče do nepájivého pole a jeho propojením pomocí propojovacích vodičů. Je vhodný k řízení dvou DC motorů nebo jednoho krokového motoru. Maximální proud pro každý motor je 1,5 A trvale a až 2 A špičkově. Dále je budič vybaven ochranou proti podpětí, přehřátí, zkratu a nadproudu.



Obr. 1.10 Budič DRV8833 (převzato z [13])

Velikost napájecího napětí VIN je v rozmezí od 2,7 do 10,8 V. Pin VMM lze použít jako napětí chráněné proti prepólování pro další zařízení. BIN1 a BIN2 slouží k řízení motoru B, obdobně piny AIN1 a AIN2 k řízení motoru A. Pin nSLEEP po přivedení logické 0 přepne budič do režimu spánku s nízkou spotřebou. Výstup nFAULT signalizuje ve stavu logická 0 nadproud, přehřátí nebo podpětí. BOUT1 a BOUT2 jsou výstupy pro motor B, podobně AOUT1 a AOUT2 pro motor A. AISEN a BISEN jsou standardně odpojeny, ale po doplnění rezistorů lze měřit velikost proudů motorů, AISEN pro motor A a BISEN pro motor B.

Tab. 1.III Pravdivostní tabulka budiče DRV8833

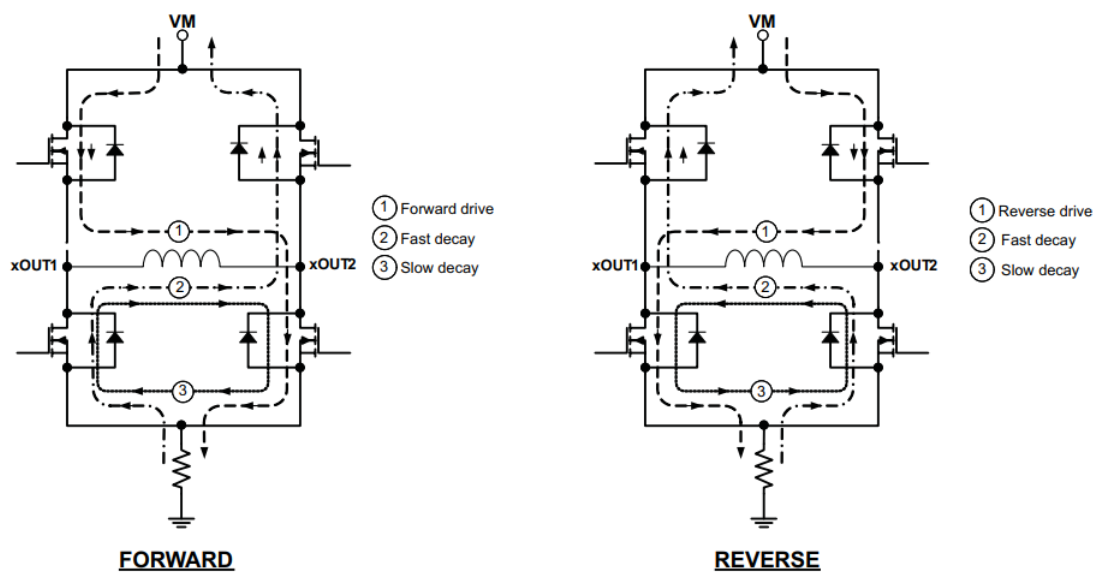
xIN1	xIN2	xOUT1	xOUT2	funkce
0	0	Z	Z	pomalá brzda – odpojení motoru
1	0	1	0	jízda vpřed
0	1	0	1	jízda vzad
1	1	0	0	rychlá brzda – zkratování motoru

Pro řízení motorů je využita čtveřice signálů. Logika řízení je IN/IN. Signál xIN1 ovládá výstup xOUT1 a xIN2 ovládá výstup xOUT2. Při logické 1 na daném vstupu je na odpovídajícím výstupu napájecí napětí motoru (VIN), při logické 0 je na výstup přivedena zem. Pokud se má motor otáčet jedním směrem, je třeba přivést na xIN1 logickou 0 a na xIN2 logickou 1. Pro otáčení opačným směrem bude xIN1 v logické 1 a xIN2 v logické 0.

Tab. 1.IV Rozdíly mezi rychlým a pomalým bržděním

xIN1	xIN2	funkce
PWM	0	Jízda vpřed – pomalé brždění
1	PWM	Jízda vpřed, - rychlé brždění
0	PWM	Jízda vzad – pomalé brždění
PWM	1	Jízda vzad – rychlé brždění

Pro regulaci otáček se využívá PWM signál, jehož maximální frekvence může být až 50 kHz. Podle stavu signálu, na který není přiveden PWM signál, je možné volit mezi režimem rychlého a pomalého brždění, rozdíl je vysvětlen v následujícím odstavci.



Obr. 1.11 Znáornění protékajícího proudu s rychlým a pomalým bržděním (převzato z [13])

Kvůli induktivnímu charakteru motoru nemůže jím protékající proud zaniknout skokově, ale musí být zajištěno, aby proud protékal dále i po zavření tranzistorů v můstku. Pokud je v logické 0, nachází se budič v režimu pomalé brzdy (fast decay). To znamená, že při střídě 0 % PWM signálu dojde k uzavření všech tranzistorů a zbytkový proud se uzavírá přes zpětné diody. Pokud je v logické 1, jedná se o režim rychlé brzdy (slow decay) a zbytkový proud se uzavírá pomocí zkratování vedení motoru, jak je vidět v obrázku (1.11).

1.2.5 X-NUCLEO-IHM12A1 (STSPIN240)

Posledním popisovaným budičem je shield od firmy STMicroelectronics, který obsahuje integrovaný obvod STSPIN240. Následující informace jsou čerpány z dokumentace výrobce dostupné na webových stránkách [14].

Shield nabízí připojení pomocí Arduino nebo ST Morpho konektorů a je určený k řízení dvou stejnosměrných motorů. Nabízí ochranu proti nadproudu, přehřátí a zkratu na výstupu. Rozsah napájecího napětí shieldu je od 1,8 V do 10 V a maximální proud pro každý motor je až 1,3 A.



Obr. 1.12 Budič IHM12A1 (STSPIN240) (převzato z [14])

Pro připojení napájecího napětí a motorů slouží šroubovací svorky. Napájecí napětí se připojuje ke svorkám označeným Vin a GND, motory jsou pak připojeny pomocí svorek A+ a A- pro motor A a B+ a B- pro motor B. Shield obsahuje také LED indikující stav jednotlivých výstupů pro motory.

Tab. 1. V Pravdivostní tabulka budiče IHM12A1 (STSPIN240)

STBY/RESET	PH _x	PWM _x	funkce
0	X	X	neaktivní výstup
1	0	0	brzda
1	0	1	jízda vpřed
1	1	0	brzda
1	1	1	jízda vzad

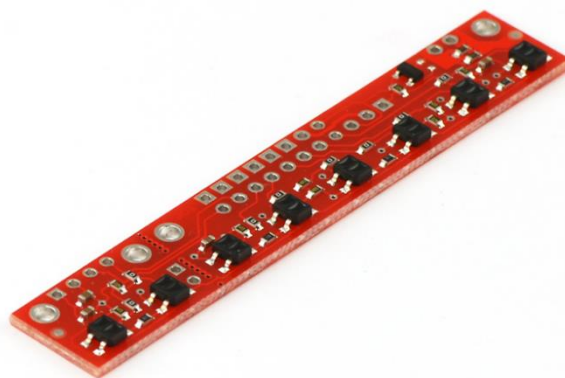
Řízení každého motoru je obstaráno pomocí dvojice signálů s logikou EN/DIR (v tomto případě PWM/PH). Signál PH_x slouží ke zvolení směru otáčení daného motoru. Signálem PWM_x pak lze řídit otáčky daného motoru. Sdílený signál STBY/RESET slouží k povolení výstupů, v logické 0 přejde obvod do režimu nízké spotřeby a výstupní výkonové obvody zůstávají neaktivní, v logické 1 dojde k aktivování výkonových obvodů.

1.3 Senzory

V této podkapitole se pojednává o senzorech, které jsou v práci použity pro jízdu po čáře (line follower). Úkolem těchto senzorů je tedy určit polohu čáry, po které má podvozek za úkol jet. V principu se v obou případech jedná o řadu senzorů odrazivosti. Každý takový senzor je tvořen IR LED a fototranzistorem.

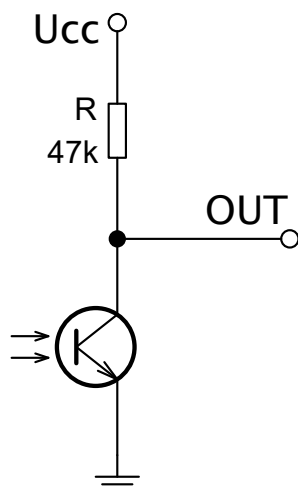
1.3.1 LEGO

Prvním typem senzorů je QTR-8A od firmy Pololu. Následující informace jsou čerpány z webových stránek výrobce [15].



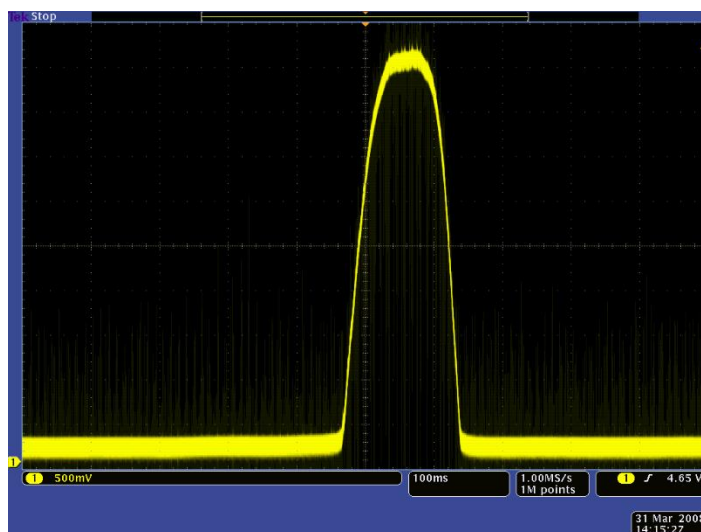
Obr. 1.13 Modul senzorů Pololu QTR-8A (převzato z [15])

Modul je primárně určený jako senzor čáry, lze ho ale použít i jako obecný senzor přiblížení nebo odrazivosti. Obsahuje 8 senzorů s roztečí 9,5 mm. Napájecí napětí je 5 V, případně je možné nakonfigurovat 3,3 V propojením příslušných pinů.



Obr. 1.14 Schéma zapojení jednoho senzoru modulu QTR-8A

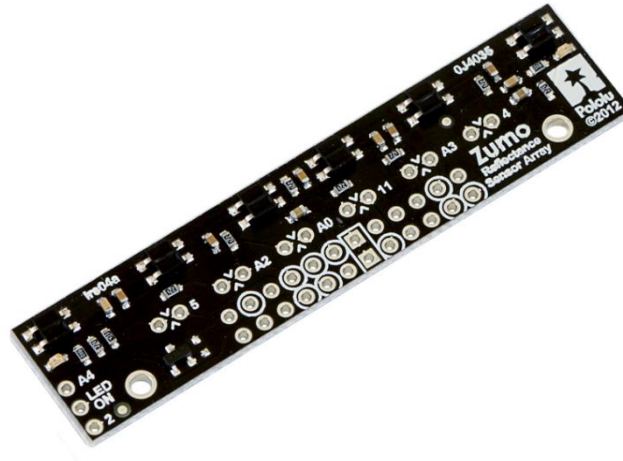
Každý fototranzistor je připojený k pull-up rezistoru a společně tvoří napěťový dělič. Napětí z tohoto děliče se pohybuje v rozsahu od 0 V do napájecího napětí a tvoří tak analogový výstup jednoho senzoru. Při povrchu s velkou odrazivostí, jako například bílá plocha, je fototranzistor otevřen a napětí výstupu se blíží k 0 V. V případě povrchu s nízkou odrazivostí, jako například černá plocha, se fototranzistor uzavře a výstupní napětí se blíží napájecímu napětí. Každý senzor má nezávislý výstup, na modulu jich tak lze najít 8, společně se vstupem pro rozsvícení IR LED s názvem LEDON. Pro zpracování je potřeba, aby měl mikrokontrolér analogový vstup, respektive A/D převodník.



Obr. 1.15 Průběh napětí na senzoru při přejetí černé čáry (převzato z [15])

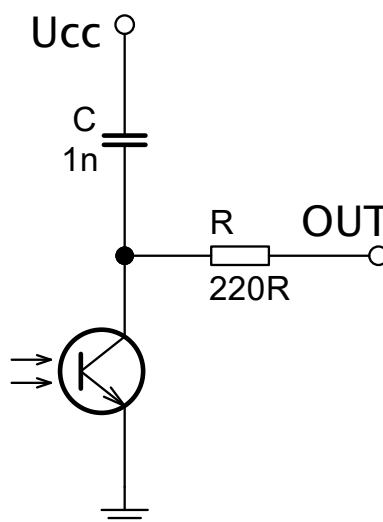
1.3.2 ZUMO

Druhým typem senzorů je modul určený přímo pro podvozek ZUMO od firmy Pololu. Následující informace jsou čerpány z dokumentace výrobce dostupné na webových stránkách [16].



Obr. 1.16 Modul senzorů pro podvozek ZUMO (převzato z [16])

Modul obsahuje řadu 6 senzorů, každý senzor tvoří IR LED a fototranzistor. Krajní senzory mají větší rozteč pro využití celé šířky modulu a snížení možnosti „ztracení čáry“. Dále se na modulu nacházejí 2 červené LED.



Obr. 1.17 Schéma zapojení jednoho senzoru

Ke každému fototranzistoru je sériově připojen kondenzátor o kapacitě 1 nF, tato kombinace je připojena k I/O signálu mikrokontroléru přes rezistor. Způsob měření je následující:

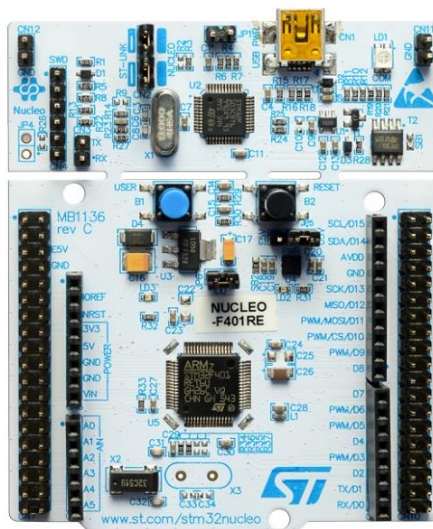
1. Zapnout IR LED
2. Nastavit I/O signál jako výstupní a do logické 1
3. Počkat několik milisekund, aby se vybil kondenzátor a objevilo se na výstupu 5 V
4. Nastavit I/O signál jako vstupní (bez pull-up/pull-down rezistorů)
5. Změřit čas než se nabije kondenzátor a vstup přejde do logické 0

Pokud je pod senzorem povrch s vysokou odrazivostí, jako například bílý povrch, fototranzistor bude otevřen a čas nabití bude krátký (desítky mikrosekund). V opačném případě, například černý povrch, bude fototranzistor otevřen jen částečně a čas nabíjení se prodlouží (až jednotky milisekund). Z tohoto vyplývá, že pro měření není potřeba analogový vstup mikrokontroléru, ale stačí šestice I/O signálů pro senzory a jeden pro zapnutí IR LED.

1.4 Vývojová deska Nucleo STM32 411RE

Základem všech použitých podvozků je vývojová deska Nucleo STM32411RE od firmy STMicroelectronics. Slouží ke zpracování dat ze senzorů a řízení budičů, respektive motorů. Následující informace jsou čerpány z dokumentace výrobce dostupné na webových stránkách [17].

Vývojová deska je postavena na vysoce výkonném 32bitovém procesoru ARM Cortex - M4, který je schopný pracovat na frekvenci až 100 MHz. Dále deska disponuje 512 kB flash paměti a 128 kB SRAM paměti. Uplatnění najde při řízení motorů, v průmyslových aplikacích (programovatelné logické automaty, měniče, zabezpečovací systémy apod.)



Obr. 1.18 Vývojová deska Nucleo STM32 411RE (převzato z [17])

Jelikož vývojová deska disponuje velkým množstvím periférií, budou v této kapitole popsány pouze periferie a registry, které byly v práci použity.

1.4.1 GPIO (General Purpose Input/Output)

Periferie se stará o vstupy a výstupy. Ze vstupů lze získávat data ze senzorů, tlačítek apod. Pomocí výstupů jsou řízeny další obvody jako LED, bzučáky, displeje nebo různé budiče. Vývojová deska obsahuje 6 bran GPIOx označených A, B, C, D, E nebo H. Každá brána (kromě H) obsahuje 16 I/O signálů. K práci s těmito I/O signály slouží několik 32bitových registrů, ve kterých se nastavují 1bitové (2 možnosti nastavení), 2bitové (4 možnosti nastavení) nebo 4bitové (16 možností nastavení) vlastnosti.

Tab. 1.VI Registry v GPIO periferii

Registr	Popis	Možnosti
MODER	Režim signálu	Vstup/výstup/alternativní/analogový
OTYPER	Typ výstupu	Push-pull/open-drain
OSPEEDR	Rychlost hrany signálu	Low/medium/fast/high speed
PUDPR	Nastavení pull rezistorů	Pull-up/pull-down
ODR	Nastavení/čtení signálu	0/1
IDR	Čtení vstupů	Celý word 0/1
BSRR	Nastavení výstupů	Nižších 16 b nastavuje do logické 1 vyšších 16 b do logické 0
AFRH	Volba alternativních režimů	PWM/USART/SPI/ADC a další
AFRL		

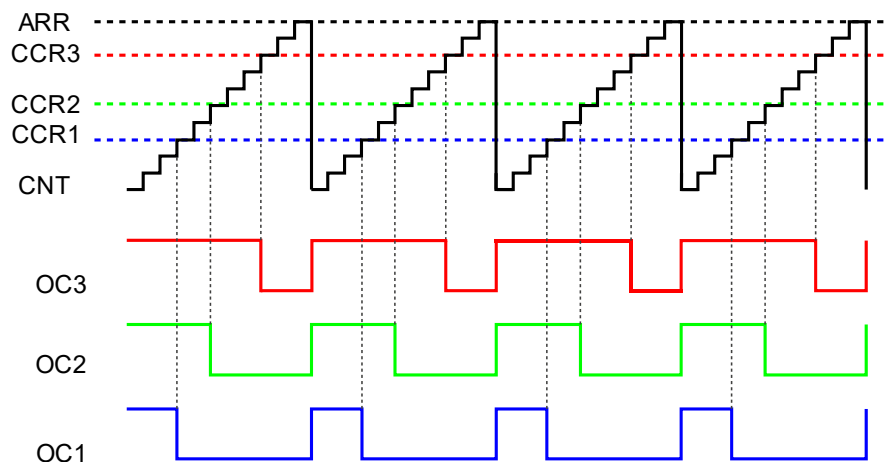
1.4.2 TIM2 to TIM5 (General-purpose timers)

Skupina nezávislých časovačů TIM2 až TIM5 se v práci používá pro generování PWM signálu. Jedná se o 16bitové (TIM3 a TIM4) a 32bitové (TIM2 a TIM5) časovače. TIM2 až TIM5 jsou připojeny na sběrnici APB1. Stejně jako v případě GPIO se činnost časovače nastavuje několika registry.

Tab. 1.VII Registry v TIM2 až TIM5 periférii

Registr	Vlastnost	Popis	Možnosti
PSC	PSC	Předdělička vstupních pulsů pro časovač	0 až 2^{16}
ARR	ARR	Hodnota, do které se čítá (up-count) nebo od které se odečítá (down-count)	0 až 2^{16}
CNT	CNT	Vnitřní hodnota časovače	0 až 2^{16}
CR1	CEN	Povolení časovače	Povoleno/zakázán
	DIR	Směr čítání	Nahoru/dolů
DIER	UIE	Povolení generování přerušeni při události	Povoleno/zakázáno
SR	UIF	Příznak události (přetečení/podtečení)	Vyvolána/nevyvolána
CCRx	CCRx	Kanálový registr	0 až 2^{16}
CCMR1	CCxS	Volba výstupního režimu (kanál 1 a 2)	Výstup/vstupy
	OCxM	Režim výstupu	PWM1 apod.
CCER	CCxE	Povolení kanálu	Povoleno/nepovoleno
	CCxP	Polarita aktivní úrovně	1/0

Časovač se také využívá ke generování PWM signálu. Každý časovač má čtyři nezávislé kanály CAPCOM (CAPture COMpare). Tyto kanály mohou pracovat ve dvou režimech. CAPTURE, který při vnější události uloží stav čítače do datového registru a COMPARE, který při shodě hodnoty datového registru kanálu s časovačem nastaví výstup. Generování PWM je pak speciálním režimem COMPARE bloku.



Obr. 1.19 Průběhy hodnot v registrech při generování PWM pomocí časovače

V kanálových registrech CCRx, kde x představuje číslo kanálu, jsou uloženy hodnoty, se kterými je porovnávána hodnota v registru CNT daného časovače. Princip generování pomocí COMPARE registru bude vysvětlen na následujícím příkladu podle obrázku (1.19). Je předpokládán čítač CNT, který čítá vzhůru. Pokud platí, že $CNT \leq CCRx$, zůstává výstup v aktivní úrovni (zde logická 1). Ve chvíli, kdy se hodnota časovače CNT dostane na vyšší hodnotu než CCRx, překloupí se výstup do neaktivní úrovně (zde logická 0). Když dojde k přetečení (CNT dosáhne hodnoty ARR), tak výstup přejde zpět do aktivní úrovně a proces se opakuje.

1.4.3 ADC (Analog to Digital Converter)

Další periferií je analogově digitální převodník. Ten slouží k převedení analogové hodnoty napětí do digitální podoby, aby bylo možné jejich další zpracování pomocí mikrokontroléru.

Převodník má až 16 vnějších (GPIO) a 3 vnitřní vstupy. Takt převodu je možné změnit předděličkou a jde z APBx sběrnice. Start převodu lze provést softwarově nebo podle události (např. od časovače nebo vstupu). Konec převodu lze zajistit softwarovým testováním bitu „konec převodu“, přerušením nebo DMA – automatické ukládání naměřených hodnot do pole pro další zpracování. Lze použít dva typy měření. Regular, kdy se měří jedna hodnota, případně sekvence, je nutné každé další měření spustit a využívá se jeden datový registr. Druhým způsobem je Injection, kdy se jedním spuštěním změří až 4 hodnoty, které se zapíší do 4 datových registrů. Řídící bity začínají písmenem J.

Tab. 1.VIII Registry v ADC periferii

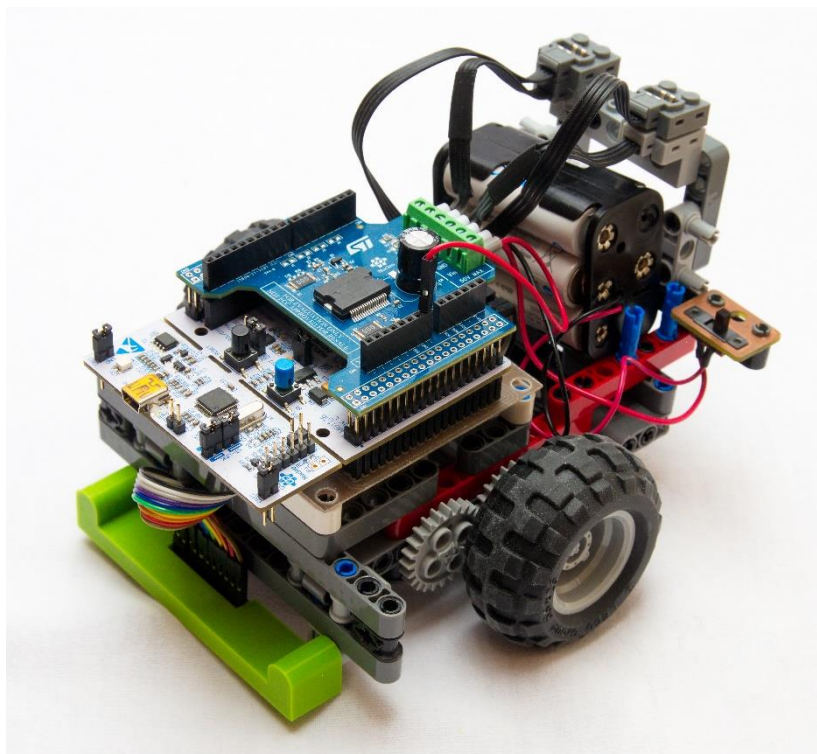
Registr	Vlastnost	Popis	Možnosti
CR1	RES	Rozlišení převodníku	12/10/8/6 bitů
	SCAN	Povolení práce	Povoleno/nepovoleno
CR2	ADON	Zapnutí převodu po dokončení všech nastavení.	Zapnuto/vypnuto
	SWSTART	Spuštění Regular kanálů	Spuštění/reset
	ALIGN	Zarovnání hodnoty v registru	Vlevo/vpravo
SMPR1 SMPR2	SMPx	Určení doby převodu	3 až 480 cyklů
SQR1	L	Počet konverzí v sekvenci	1 až 16 konverzí
	SQ13 až SQ16	Volba kanálů pro měření v sekvenci	
SQR2	SQ7 až SQ12		
SQR3	SQ1 až SQ6		
SR	EOS	Signalizace dokončení převodu	Dokončeno/nedokončeno
DR	DATA	Převedená data	

1.5 Podvozky dostupné na katedře

V této kapitole budou krátce popsány jednotlivé podvozky a bude jim jednotlivě přiřazen HW z předchozích kapitol.

1.5.1 LEGO

Prvním popisovaným podvozkem je LEGO podvozek. Jak vyplývá z názvu, je tvořen ze stavebnice LEGO. Jedná se o dvoukolový podvozek, který má v zadní části pomocné kolečko. Jeho přibližné vnější rozměry jsou 16 x 14 x 10 cm (d x š x v).



Obr. 1.20 LEGO podvozek

Budič X-NUCLEO-IHM04A1 pohání dvojici LEGO motorů, které jsou pomocí převodů spojené s koly. V přední části jsou uchycené senzory QTR-8A. Tato sestava je napájena šesticí AA baterií.

1.5.2 Pololu ZUMO

Dalším podvozkem je Pololu ZUMO. Jedná se o komerční řešení podvozku, kdy samotný podvozek tvoří shield, do něhož je připojena vývojová deska přes Arduino konektory. ZUMO je pásový podvozek, přední kola jsou připojena k motoru a zadní slouží pro napnutí pásů. Přibližné vnější rozměry jsou 11 x 10 x 6 cm (d x š x v).

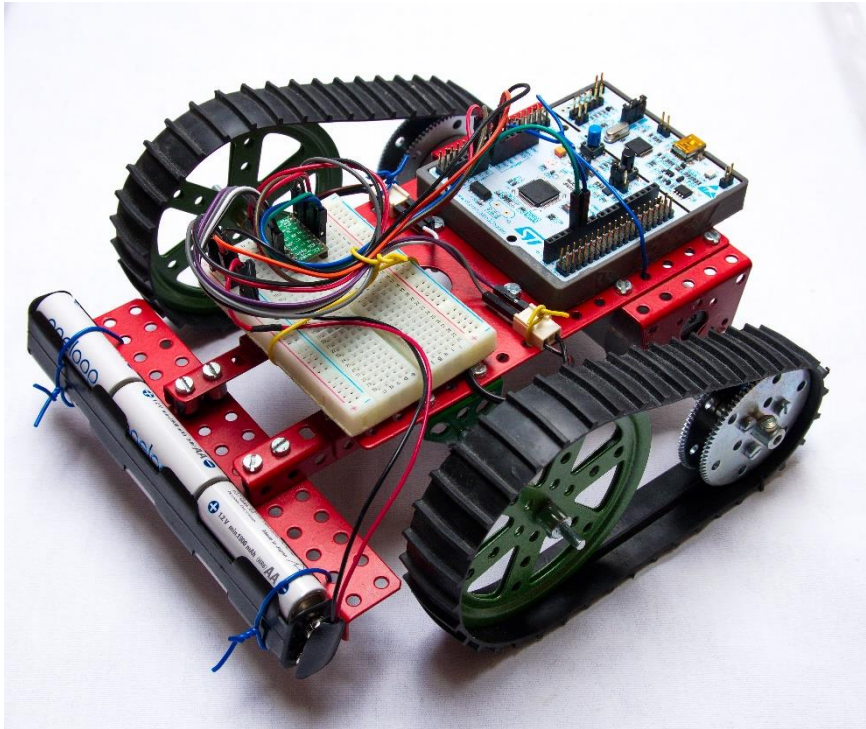


Obr. 1.21 ZUMO podvozek

ZUMO obsahuje budič DRV8835, motory Pololu HP 6V 75:1 a digitální (RC) senzory čáry. Dále obsahuje 3osý akcelerometr, kompas, bzučák, resetovací a konfigurovatelné tlačítko [11]. O napájení se stará čtveřice AA baterií.

1.5.3 Pásák

Třetím podvozkem je pásák. Jedná se o pásový podvozek zkonstruovaný ze stavebnice Merkur. S rozměry 20 x 19 x 10 cm (d x š x v) se jedná o největší a nejrobustnější použitý podvozek.

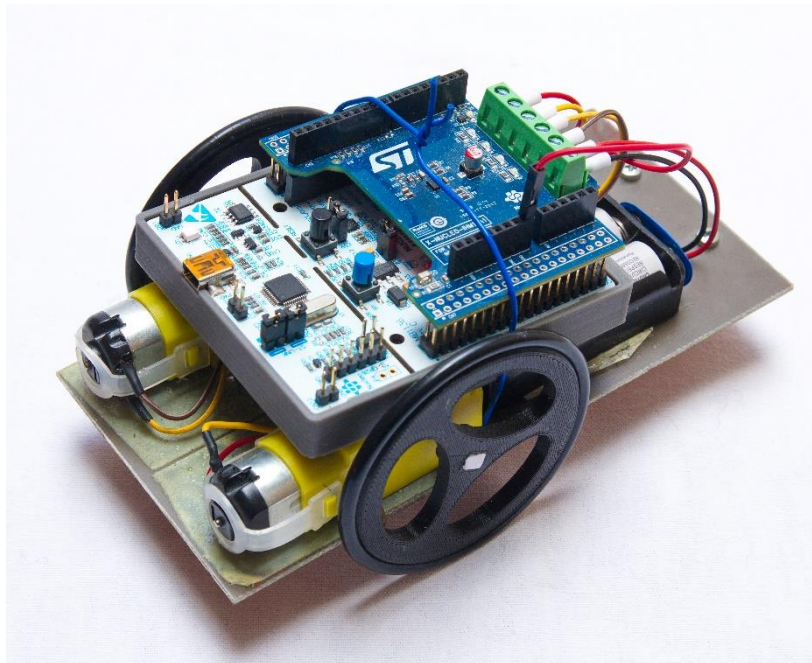


Obr. 1.22 Podvozek pásák

Elektrickou část tvoří budič DRV8835 na nepřívěm poli, dvojice motorů GM37-3530-1250-30 a napájení zajišťuje šestice AA baterií.

1.5.4 Kolový podvozek

Posledním podvozkem je kolový podvozek. Je tvořený dvojicí kol a zadním pomocným kolečkem. Přibližné vnější rozměry jsou 16 x 9 x 7 cm (d x š x v).



Obr. 1.23 Kolový podvozek

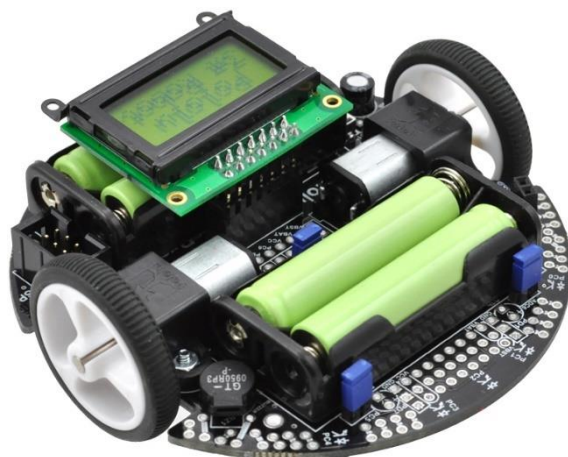
Budič použitý pro tento podvozek je X-NUCLEO-IHM12A1, napájí dvojici motorů Pololu 1593 a je napájen čtveřicí AA baterií.

1.6 Příklady komerčně dostupných podvozků

1.6.1 Pololu 3Pi

Dalším komerčním řešením je robot 3Pi od firmy Pololu. Následující informace jsou čerpány z webových stránek výrobce [18].

Jak název napovídá, jedná se o podvozek ve tvaru kruhu s průměrem 9,5 cm, přibližně tedy $3 \cdot \pi$. Podvozek je napájen pomocí čtveřice AAA baterií, v případě nabíjecích baterií tedy 4,8 V, toto napětí je ale pomocí step-up měniče zvýšeno na 9,25 V. Díky tomuto řešení lze napětí přiváděné na motory udržovat konstantní a nedochází k jeho snižování, a tedy zpomalování motorů vlivem vybíjení baterií.



Obr. 1.24 Podvozek Pololu 3Pi (převzato z [18])

O řízení se stará mikrokontrolér ATmega328P od firmy Microchip běžící na 20 MHz a poskytující 32 kB flash paměti, 2 kB RAM paměti a 1 kB EEPROM paměti. K programování lze použít Atmel Studio a jazyk C společně s Pololu knihovnami, případně platformu Arduino a jazyk Wiring.

1.6.2 Waveshare Alphabot 2

Druhým popisovaným podvozkem je Alphabot 2 od firmy Waveshare. Tento podvozek je určený pro vývojovou desku BBC micro:bit. Tato platforma, založená na ARM procesoru, je určena především pro začátečníky a děti, jak napovídají i dostupné programovací jazyky Scratch nebo MicroPython. Informace jsou čerpány z webových stránek výrobce [19]



Obr. 1.25 Podvozek Waveshare Alphabot 2 (převzato z [19])

Vývojová deska se k podvozku připojuje prostřednictvím hranového konektoru. Samotná vývojová deska se tedy zasune do konektoru na podvozku podobně jako rozšiřující karty do základní desky PC. Vývojová deska nabízí matici LED 5x5, teplotní senzor, dvě uživatelská tlačítka, kompas, akcelerometr a připojení prostřednictvím microUSB konektoru, případně Bluetooth 4.0 komunikaci.

Podvozek pak výbavu rozšiřuje o čtveřici RGB LED, dvojici IR senzorů, ultrazvukový senzor, senzory na detekci čáry a dvojici DC motorů, které jsou řízeny budičem TB6612FNG. Napájení je vyřešeno dvojicí lithiových baterií o velikosti 14500.

1.6.3 MBot Codey Rocky

Posledním popisovaným komerčním řešením je MBot Codey Rocky od firmy Makeblock. Jedná se o platformu sloužící k výuce programování pro děti. Informace pocházejí z dokumentace výrobce [20].



Obr. 1.26 Podvozek MBot Codey Rocky (převzato z [21])

Skládá se ze dvou částí. Codey jakožto mikrokontrolér s IR přijímačem a vysílačem, gyroskopem, maticovým LED displejem, reproduktorem, tlačítka a senzory osvětlení a zvuku. Druhou částí je Rocky – pásový podvozek s IR senzory vzdálenosti.

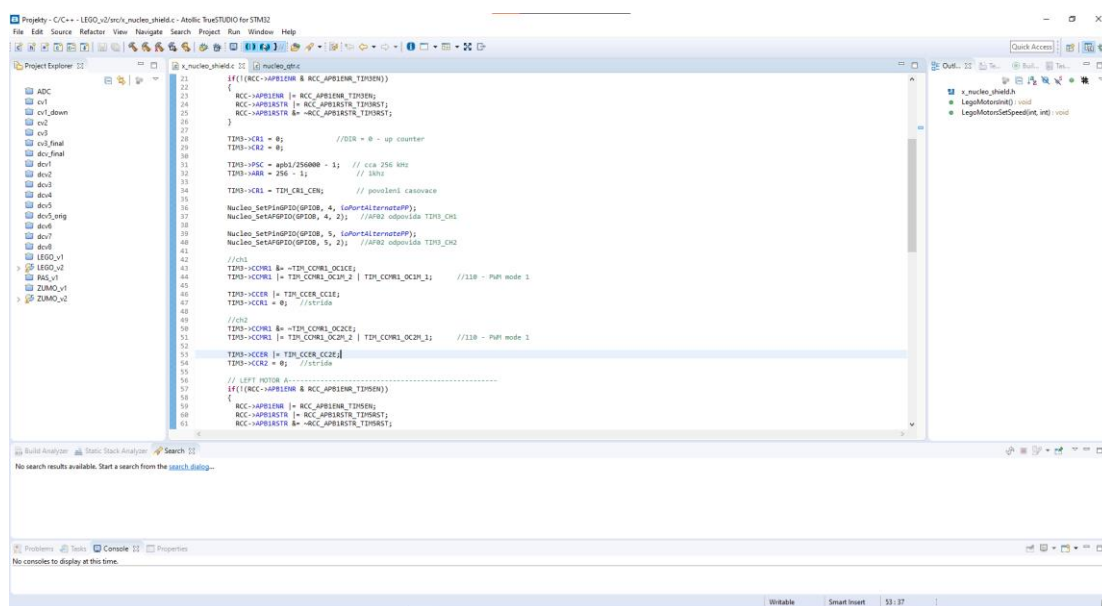
Programování je založeno na MicroPython s grafickou nástavbou. Propojení s PC je realizováno pomocí Bluetooth, které lze využít i pro připojení dálkového ovládání.

2 SOFTWARE

Tato kapitola se zabývá algoritmy a programovým řešením řízení jednotlivých podvozků. Z předchozí kapitoly je jasné, že každý podvozek, respektive jeho budič, vyžaduje jiné řídicí signály s patřičným časováním, a také zpracování signálů z obou typů senzorů je odlišné. Proto vznikají v řídicích programech, které na první pohled plní stejnou činnost, odlišnosti, o kterých je v následujících kapitolách pojednáváno.

2.1 Vývojové prostředí Atollic TrueSTUDIO

Pro vytvoření programů bylo použito vývojové prostředí Atollic TrueStudio od firmy STMicroelectronics. Informace jsou převzaty z webových stránek výrobce [22].



Obr. 2.1 Vývojové prostředí TrueSTUDIO

Prostředí je založeno na Eclipse, je tedy adresářově/souborově orientované. Pracovní prostor (workspace) obsahuje společná nastavení (zobrazení, barvy atd.). Každý workspace obsahuje jeden nebo více projektů. Projekt je obvykle jeden program, který se jako celek spustí v HW. Po přeložení a spuštění programu se přejde do perspektivy ladění (debug), kde je možné program pozastavit a sledovat stav proměnných, registrů a krokovat program.

2.2 Funkce pro jednotlivé podvozky

Pro snadnou práci s budiči a senzory jsou vytvořeny funkce. Tyto funkce tak zjednodušují několik jednotek až desítek řádků kódu na jedno volání funkce v hlavním programu. Soubor `rizeni.c` obsahuje funkci pro inicializaci a funkci pro nastavení rychlosti motorů. Tyto funkce jsou společné pro všechny podvozky a jejich chování je dáno vstupním parametrem.

2.2.1 Inicializační funkce motorů

Inicializační funkce motorů slouží k prvotnímu nastavení potřebných periférií pro práci s budiči. Funkce má jako vstupní parametr typ použitého podvozku. Každý budič, respektive podvozek, potřebuje rozdílnou inicializaci, jelikož řídicí signály mají různou logiku, jsou připojeny na různé I/O signály a pomocné signály (RESET, REF apod.) jsou také odlišné. Toto je realizováno switch-case strukturou. Výstupním parametrem funkce je typ zvoleného podvozku sloužící pro další zpracování v hlavním programu.

U čtveřice budičů se rozlišují dva způsoby jejich řízení. Způsob EN/DIR, kdy je stavem jednoho signálu ovládn směr otáčení motoru a na druhý signál je přiveden PWM signál pro řízení rychlosti otáčení motoru. Druhým způsobem je IN/IN, kdy signálem jsou přímo ovládnány jednotlivé výstupy motoru.

```
case zumo:
    Nucleo_SetPinGPIO(ZUMO_M2DIR, ioPortOutputPP);           //pin DIR jako vystup
    Nucleo_SetPinGPIO(ZUMO_M1DIR, ioPortOutputPP);           //pin DIR jako vystup
    Nucleo_SetPinGPIO(ZUMO_BUTTON, ioPortInputPU);
    // PRAVY MOTOR M1
    if(!(RCC->APB1ENR & RCC_APB1ENR_TIM3EN))                 //test hodin
    {
        RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM3EN;
        RCC->APB1RSTR |= RCC_APB1RSTR_TIM3RST;
        RCC->APB1RSTR &= ~RCC_APB1RSTR_TIM3RST;
    }
    TIM3->CR1 = 0;                                           //DIR = 0 - up counter
    TIM3->CR2 = 0;                                           //zadne dalsi spec funkce
    TIM3->PSC = apb1/2040816 - 1;                            // cca 2 MHz
    TIM3->ARR = 256 - 1;                                     // 8khz
    TIM3->CR1 = TIM_CR1_CEN;                                 // povoleni casovace
    Nucleo_SetPinGPIO(ZUMO_M1PWM, ioPortAlternatePP);
    Nucleo_SetAFGPIO(ZUMO_M1PWM, 2);                        //AF02 odpovida TIM3_CH2
    TIM3->CCMR1 &= ~TIM_CCMR1_OC2CE;
    TIM3->CCMR1 |= TIM_CCMR1_OC2M_2 | TIM_CCMR1_OC2M_1;    //110 - PWM mode 1
    TIM3->CCER |= TIM_CCER_CC2E;                            //povoleni channel 2
    TIM3->CCR2 = 0;                                         //strida
```

Obr. 2.2 Příklad inicializace motoru řízeného EN/DIR logikou

Způsob EN/DIR lze nalézt u kolového podvozku a ZUMO. I/O signály připojené na DIRA a DIRB jsou nastaveny jako výstupní, jelikož na ně stačí přivést logickou 0 nebo 1. I/O porty, ke kterým jsou připojeny ENA a ENB, jsou nastaveny do alternativního režimu generování PWM signálu pomocí časovače. Celkem jsou tedy potřeba dva kanály časovače pro generování PWM signálů.

```

case pasak:
  // PRAVY MOTOR A
  if(!(RCC->APB1ENR & RCC_APB1ENR_TIM3EN))    //test hodin
  {
    RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM3EN;
    RCC->APB1RSTR |= RCC_APB1RSTR_TIM3RST;
    RCC->APB1RSTR &= ~RCC_APB1RSTR_TIM3RST;
  }
  TIM3->CR1 = 0;           //DIR = 0 - up counter
  TIM3->CR2 = 0;           //zadne dalsi spec funkce
  TIM3->PSC = apb1/2040816 - 1;    // cca 2 MHz
  TIM3->ARR = 256 - 1;    // cca 8khz
  TIM3->CR1 = TIM_CR1_CEN;    // povoleni casovace

  Nucleo_SetPinGPIO(DRV8833_IN1A, ioPortAlternatePP);
  Nucleo_SetAFGPIO(DRV8833_IN1A, 2);    //AF02 odpovida TIM3_CH1
  Nucleo_SetPinGPIO(DRV8833_IN2A, ioPortAlternatePP);
  Nucleo_SetAFGPIO(DRV8833_IN2A, 2);    //AF02 odpovida TIM3_CH2
  //nastaveni channel 1
  TIM3->CCMR1 &= ~TIM_CCMR1_OC1CE;
  TIM3->CCMR1 |= TIM_CCMR1_OC1M_2 | TIM_CCMR1_OC1M_1;    //110 - PWM mode 1
  TIM3->CCER |= TIM_CCER_CC1E;
  TIM3->CCR1 = 0;    //strida

  //nastaveni channel 2
  TIM3->CCMR1 &= ~TIM_CCMR1_OC2CE;
  TIM3->CCMR1 |= TIM_CCMR1_OC2M_2 | TIM_CCMR1_OC2M_1;    //110 - PWM mode 1
  TIM3->CCER |= TIM_CCER_CC2E;
  TIM3->CCR2 = 0;    //strida

```

Obr. 2.3 Příklad inicializace motoru řízeného logikou IN/IN

Podvozek LEGO a pásák pak zastupují režim IN/IN. V tomto případě jsou všechny čtyři I/O signály připojené k IN1A, IN2A, IN1B a IN2B nastaveny do alternativního režimu pro generování PWM. Je tedy potřeba použít čtyři kanály časovače pro generování PWM signálů.

Samotná inicializace časovačů probíhá v několika krocích. Nejprve je otestováno, zda jsou povoleny hodiny pro daný časovač, a pokud nejsou, dojde k jejich povolení a resetování. Následně se nastavují potřebné hodnoty do registrů pro časovač i samotné kanály. Popisovat zde tento proces krok po kroku by bylo zbytečné, jelikož v samotném kódu jsou napsány komentáře, které vše vysvětlují. Z těchto nastavení jsou podstatné registry PSC a ARR, které určují výslednou frekvenci PWM signálu. Požadovaná frekvence je 8 kHz pro všechny podvozky, respektive motory kromě LEGO podvozku, jehož motory vyžadují frekvenci 1 kHz. Výsledná frekvence je určena podle vztahu (2.1).

$$f_{PWM} = \frac{\frac{APB1Clock}{PSC}}{ARR} [Hz], \quad (2.1)$$

APB1Clock odpovídá SystemCoreClock, který má hodnotu 100 MHz. Dalším požadavkem je hodnota $ARR = 256$, což je maximální hodnota 8bitového datového typu. Z úpravy rovnice tedy vychází vztah (2.2).

$$PSC = \frac{APB1Clock}{f_{PWM} \cdot ARR} = \frac{100\,000\,000}{8000 \cdot 256} = 48,83 \approx 49, \quad (2.2)$$

Hodnota v registru PSC je celočíselná, došlo tedy k zaokrouhlení na 49. Výsledná frekvence po zpětném dosazení do vztahu je tedy $f_{PWM} = 7972$ Hz. Obdobně pro LEGO podvozek je hodnota po zaokrouhlení $PSC = 391$ a výsledná frekvence $f_{PWM} = 999$ Hz.

2.2.2 Funkce pro řízení motorů

Po provedení inicializace budičů přichází na řadu jejich řízení. K tomu slouží beznávratová funkce se dvěma celočíselnými parametry: rychlost levého a rychlost pravého motoru. Opět je zde struktura switch-case pro zvolení správného kódu pro vybraný podvozek. Parametrem pro tuto strukturu je zvolený podvozek z inicializace.

Funkce nejprve vyhodnotí, zda je vstupní parametr kladné nebo záporné číslo a podle toho nastaví signály tak, aby se motor točil správným směrem. Záporná hodnota znamená směr vzad a kladná směr vpřed. Absolutní hodnota vstupního parametru, která může nabývat hodnoty od 0 do 255, pak nastavuje střihu PWM signálu. Opět je zde rozdíl mezi EN/DIR a IN/IN logikou řízení.

```

case zumo:
  if(leftSpeed<0) //pokud je rychlost zaporna
  {
    GPIOwrite(ZUMO_M2DIR, true); //nastavim smer vzad
  }
  else
  {
    GPIOwrite(ZUMO_M2DIR, false); //jinak smer vpred
  }

  if(rightSpeed<0) //pokud je rychlost zaporna
  {
    GPIOwrite(ZUMO_M1DIR, true); //nastavim smer vzad
  }
  else
  {
    GPIOwrite(ZUMO_M1DIR, false); //jinak smer vpred
  }
  TIM4->CCR1 = leftSpd; //nastaveni stridy PWM
  TIM3->CCR2 = rightSpd; //nastaveni stridy PWM
  break; /* switch( zvoleny ) - case: zumo */

```

Obr. 2.4 Příklad nastavení rychlosti motoru s logikou řízení EN/DIR

V případě EN/DIR se podle směru (kladná nebo záporná vstupní hodnota) nastaví signál DIR. Rychlost se pak zapíše do CCRx registru, čímž se nastaví požadovaná střída PWM signálu a tím i rychlost motoru.

```

case pasak: //pokud je rychlost zaporna
  if(leftSpeed<0)
  {
    TIM3->CCR1 = 0; //nastavim PWM na CH2 (smer vzad)
    TIM3->CCR2 = leftSpd;
  }
  else
  {
    TIM3->CCR1 = leftSpd; //jinak nastavim PWM na CH1 (smer vpred)
    TIM3->CCR2 = 0;
  }
  if(rightSpeed<0) //pokud je rychlost zaporna
  {
    TIM5->CCR1 = 0; //nastavim PWM na CH2 (smer vzad)
    TIM5->CCR2 = rightSpd;
  }
  else
  {
    TIM5->CCR1 = rightSpd; //jinak nastavim PWM na CH1 (smer vpred)
    TIM5->CCR2 = 0;
  }
  break; /* switch( zvoleny ) - case: pasak */

```

Obr. 2.5 Příklad nastavení rychlosti motoru s logikou řízení IN/IN

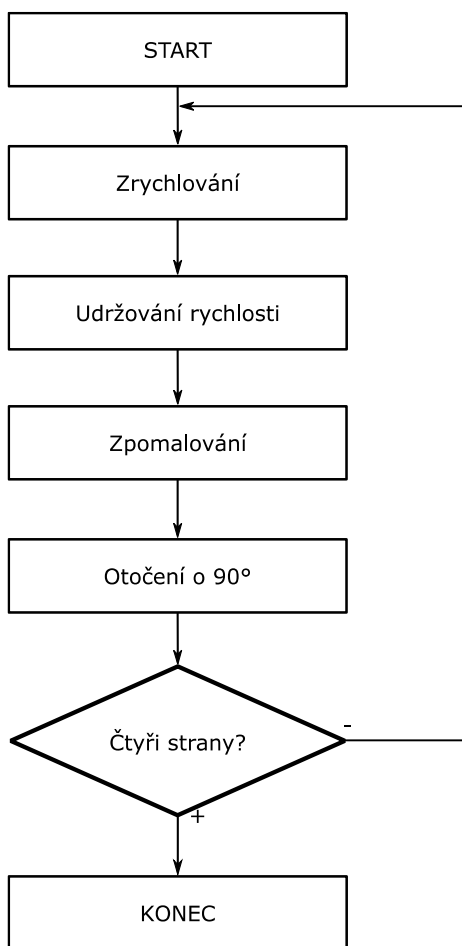
Pro řízení IN/IN dochází v případě kladné vstupní hodnoty k nastavení střídání signálu IN1x na absolutní velikost vstupního parametru a IN2x na 0. V případě záporné vstupní hodnoty se tyto signály otočí, tedy IN1x = 0 a IN2x = PWM. Nastavení střídání je opět dosaženo pomocí registrů CCRx.

2.3 Demo programy

Pro demonstraci funkčních možností podvozků slouží demo programy. Jejich princip je popsán v následujících kapitolách.

2.3.1 Jízda do čtverce

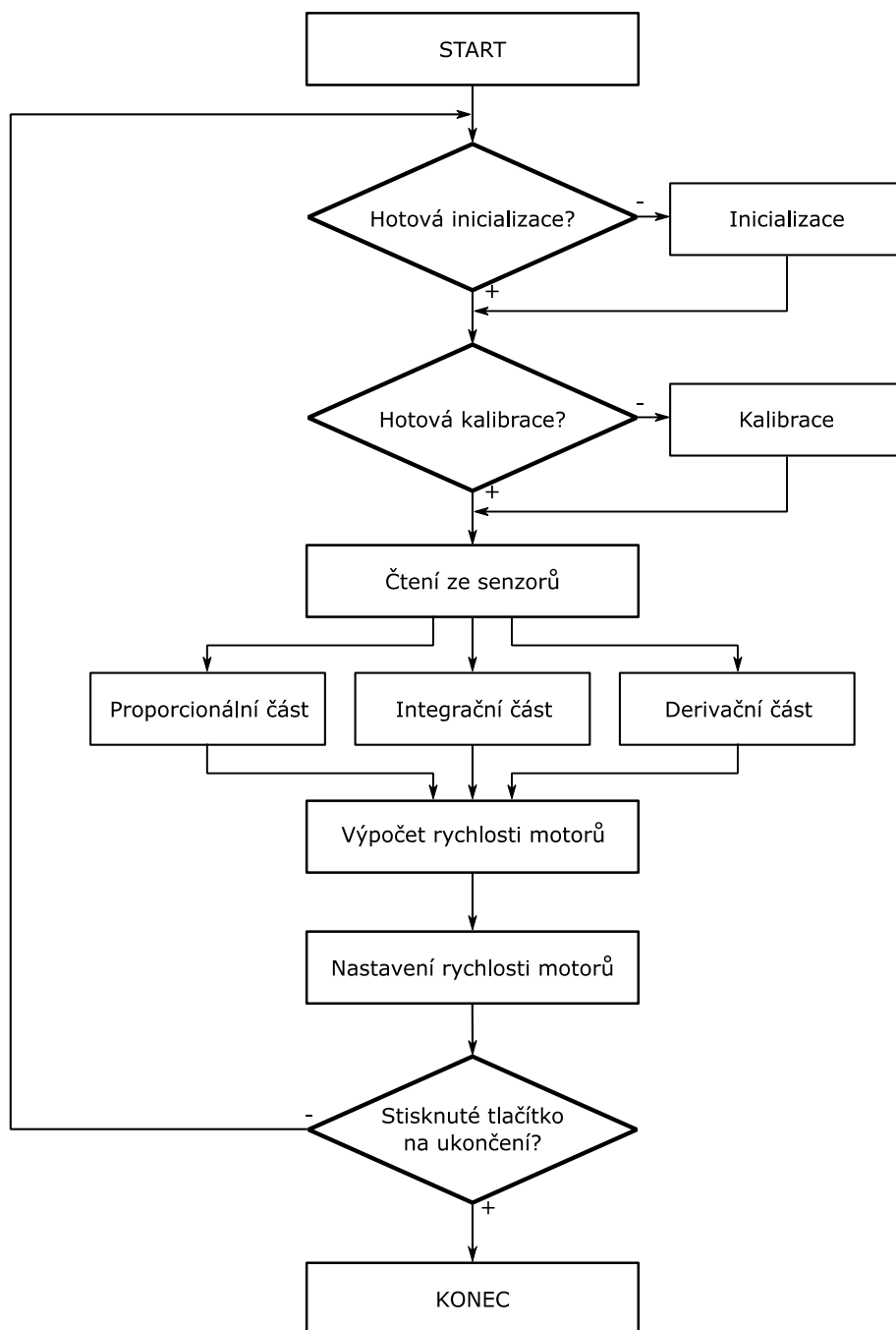
Jak napovídá název této podkapitoly, podvozek má za úkol objet čtvercovou trasu a zastavit se. Cílem tohoto programu je demonstrovat možnost plynulého řízení otáček motorů v obou směrech. Toho je dosaženo plynulým zrychlováním a zpomalováním na rovinkách a „tankovým“ způsobem otáčení v rozích čtvercové dráhy.



Obr. 2.6 Vývojový diagram demo programu jízda do čtverce

2.3.2 Jízda po čáře (line follower)

Tento demo program je dostupný pouze pro ZUMO a LEGO podvozek, jelikož kolový podvozek ani pásák nejsou vybaveny senzory čáry. Cílem tohoto demo programu je ukázka funkce senzorů čáry a možnost regulace rychlosti motorů pomocí PID regulátoru.



Obr. 2.7 Vývojový diagram demo programu jízda po čáře

Pro práci se senzory je použita knihovna `nucleo_qtr` dostupná na katedře. Kalibrace senzorů je provedena otočením podvozku o 90° doleva, poté o 180° doprava a zpět o 90° doleva ve chvíli, kdy robot stojí na čáře. Tímto způsobem všechny senzory sejmou hodnotu čáry i okolí a kalibruje se nejvíce a nejméně odrazivá plocha.

Senzory vracejí hodnotu od 0 do $N \cdot 1000$, kdy N je počet senzorů. Tato hodnota je přepočtena na hodnotu od -1000 do 1000 jako vstup PID regulátoru, přičemž hodnota 0 znamená, že čára je uprostřed. Pro nastavení PID regulátoru slouží konstanty K_p , K_i , K_d . Výstupem PID regulátoru je aditivní rychlost, která je u jednoho motoru přičtena k základní rychlosti a u druhého motoru odečtena od základní rychlosti. Tímto způsobem robot zatáčí správným směrem podle umístění čáry.

3 Návrh budoucích rozšíření

V této kapitole budou popsány další možná rozšíření podvozků použitých v práci.

3.1 Senzory čáry pro pásáka a kolový podvozek

Rozšíření, které se přímo nabízí, je doplnění senzorů pro zbylé dva podvozky. Vzhledem k rozměrům podvozků by bylo vhodné pro oba podvozky použít modul s osmi analogovými senzory, jako je použitý u LEGO robota, tedy Pololu QTR-8A. Toto rozšíření by přineslo možnost použití demo programu Jízda po čáře (line follower).

3.2 Bezdrátové rozhraní pro ladění PID regulátoru

Další možné rozšíření také souvisí s programem sledování čáry. Stávající způsob ladění konstant PID regulátoru spočívá v nastavení konstant, nahrání programu do vývojové desky, odpojení kabelu od vývojové desky, vyzkoušení podvozku na dráze, opětovném připojení desky a další změně parametrů. Tento proces se pro pečlivé odladění regulátoru stává velice zdlouhavým.

Pomocí bezdrátového rozhraní by bylo možné měnit parametry PID regulátoru přímo během jízdy podvozku a živě sledovat jejich vliv na regulaci.

Bezdrátové rozhraní by mohl zajišťovat Bluetooth modul, který by s vývojovou deskou komunikoval pomocí sériové linky. Takovým modulem by mohl být např. HC-05 podporující rozhraní Bluetooth 2.0 s dosahem až 10 m, což je pro zmíněné účely dostatečné. [23]

3.3 Snímání otáček motorů

Snímání otáček motoru by bylo možné využít u demo programu jízda do čtverce, nebo u jakéhokoli programu s požadavkem na přesné pozicování podvozku, obecně tedy jako zpětná vazba od motorů.

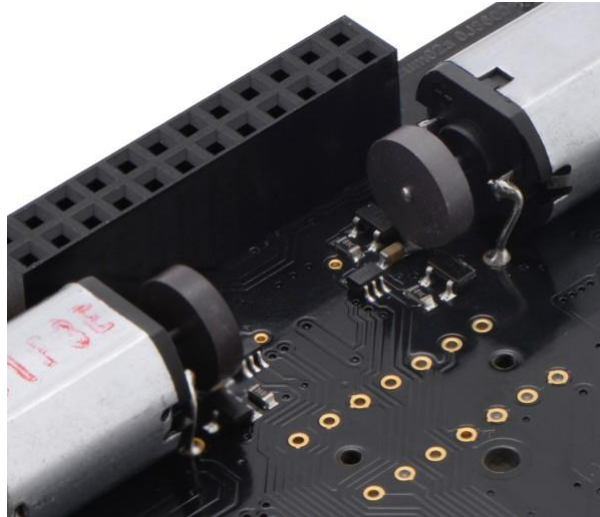
Při současném pokusu o kopírování čtvercové trasy dochází, zejména u otáčení, k nepřesnostem. Ty jsou způsobeny tím, že sestava motorů s převodovkami nereaguje vždy na přiložené napětí stejně. To může být způsobeno rozdílným odporem v převodkách, rozdílností opotřebení kartáčů v motorech apod.

Důsledkem toho je například nutnost korekce jízdy rovně u kolového podvozku, kdy musí být na pravém motoru vyšší hodnota rychlosti než na levém. Při zajištění stálé trakce kol vůči podkladu by bylo možným řešením snímání otáček motoru. Tato informace by tvořila zpětnou vazbu od motorů a byla by v programu zpracována pro jejich přesnou regulaci.



Obr. 3.1 Motor Pololu Mini osazený magnetickým enkodérem (převzato z [24])

U motorů Pololu 1593, použitých v kolovém podvozku, výrobce nabízí řešení pro snímání otáček v podobě magnetického enkodéru. Tento enkodér vyžaduje motor s oboustrannou hřídelí, na kterou je nasazen 6pólový magnetický disk. Enkodér obsahuje dva senzory pracující na principu Hallova jevu, které generují impulsy úměrné otáčení motoru. Díky dvěma sensorům lze kromě počtu otáček určit i směr otáčení motoru. [24]



Obr. 3.2 ZUMO osazený magnetickými enkodéry (převzato z [25])

Enkodéry stejného typu by bylo možné použít i u podvozku ZUMO, motory Pololu HP 6V 75:1 jsou také nabízené s oboustrannou hřídelí, na kterou by bylo možné umístit magnetický disk. V nejnovější revizi podvozku ZUMO 32U4 je dokonce toto řešení integrované přímo na DPS. [25]



Obr. 3.3 Motor GM37-3530 osazený magnetickým enkodérem (převzato z [26])

Pro motory GM37-3530 použité v pásáku také výrobce nabízí variantu s oboustrannou hřídelí pro magnetický enkodér [26], ovšem v současném konstrukčním uspořádání, kdy jsou zadní části motorů těsně u sebe, by nebylo možné enkodéry osadit. Bylo by tedy třeba podvozek rozšířit, což by vzhledem k možnostem stavebnice Merkur nebyl problém.



Obr. 3.4 Enkodér GlideWheel navržený pro použití s LEGO motory (převzato z [27])

Pro LEGO podvozek je v nabídce enkodér GlideWheel [27], který by bylo možné s mechanickou úpravou podvozku osadit buď na hřídele motorů, případně na hřídele samotných kol.

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala elektrickou částí podvozků dostupných na Katedře elektroniky a informačních technologií. Jejím cílem bylo navržení funkčního řešení elektroniky pro tyto podvozky, vytvoření vzorových programů a navržení dalších senzorů pro autonomní řízení.

Z podvozků dostupných na katedře byly vybrány čtyři podvozky: LEGO podvozek, pásák, kolový podvozek a komerční podvozek ZUMO, pro které byly vybrány budiče vhodné pro jejich motory. Pro větší záběr práce byl pro každý podvozek vybrán jiný typ budiče. Všechny podvozky byly řízeny mikrokontrolérem Nucleo STM32 F411RE. Práce byla rozdělena na tři hlavní kapitoly.

První kapitola se zabývala hardwarem. Nejprve byl popsán obecný princip stejnosměrných motorů a možnosti regulace jejich otáček, následoval popis motorů použitých v podvozcích obsahující základní parametry, jimiž jsou jmenovité napětí a proud, jmenovité otáčky a moment a maximální moment. Následně byl pomocí zjednodušeného principiálního schématu vysvětlen princip plného H-můstku ve funkci budiče stejnosměrného motoru při režimech jízdy vpřed, vzad a brždění. Poté byly popsány budiče použité v podvozcích. Byly zde zmíněny hlavní parametry, tedy rozsah napájecího napětí a maximální proud do motorů, dále pak pro každý budič byla vytvořena pravdivostní tabulka znázorňující funkci připojených motorů v závislosti na stavu řídicích signálů. Následně byly popsány senzory čáry, analogový typ osazený na podvozku LEGO a digitální typ na podvozku ZUMO. Byly zde uvedeny postupy čtení hodnot pro oba typy senzorů, na kterých byl vysvětlen rozdíl mezi analogovými a digitálními senzory čáry. Následoval popis vývojové desky Nucleo STM32 F411RE, kde byly zmíněny periferie GPIO, TIM2 to TIM5 a ADC a jejich registry použité v práci. Též zde byly vytvořeny tabulky ukazující význam jednotlivých registrů. V poslední části kapitoly byly popsány jednotlivé podvozky a byly jim přiřazeny budiče, motory a senzory popisované doposud. Také zde byly vyjmenovány komerčně dostupné alternativy podvozků.

Druhá hlavní kapitola se zabývala softwarem. Nejdříve zde byla popsána vývojová platforma Atollic TrueSTUDIO, která byla použita pro vytváření programů a jejich ladění. Dále byly popsány obecně inicializační funkce s ukázkou vytvořeného kódu pro inicializaci budiče s logikou EN/DIR a následně s logikou IN/IN. Další část pojednávala o funkcích pro nastavení

rychlosti motorů, opět zde byly uvedeny ukázky vytvořených kódů pro budiče s logikou EN/DIR a IN/IN. Nakonec byly v této kapitole popsány demo programy jízda do čtverce a jízda po čáře, které demonstrují funkci podvozků.

V poslední hlavní kapitole byly nastíněny možnosti rozšíření stávajících podvozků. Jako první bylo popsáno rozšíření spočívající v doplnění senzorů čáry na pásák a kolový podvozek. Další uvedená možnost rozšíření byla bezdrátová komunikace podvozků pomocí Bluetooth modulu využitelná při ladění PID regulátoru pro jízdu po čáře. Posledním popsáním rozšířením bylo doplnění motorů o zpětnou vazbu v podobě magnetických enkodérů. Ke každému podvozku bylo nalezeno konkrétní řešení enkodéru, které by bylo možné použít.

Výsledkem práce jsou tedy řídicí funkce pro čtyři typy budičů společně s demo programy a souhrn informací o motorech, budičích a senzorech. Tyto podklady mohou najít využití při používání podvozků např. při výuce, dalším rozšiřování stávajících podvozků nebo návrhu elektrické části podvozků nových.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Bartoš, V.; Červený, J.; Hruška, J.; et al. Elektrické stroje, 1st ed.; Západočeská univerzita v Plzni: Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 2006.
- [2] LEGO 9V Technic Motors compared characteristics. Philo's Home Page [online] [cit. 15.04.2021]. Dostupné z: <https://www.philohome.com/motors/motorcomp.htm>
- [3] Pohonné funkce – motor M 8883 | Různé | Oficiálního LEGO® obchodu CZ . [online]. Copyright ©2021 The LEGO Group. Všechna práva vyhrazena. Použitím těchto stránek vyjadřujete svůj souhlas s podmínkami použití. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.lego.com/cs-cz/product/lego-power-functions-m-motor-8883>
- [4] Pololu - 75:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2361>
- [5] HP 6V 410RPM Micro Metal Geared DC Motor (75: 1) Buy Affordable - Direnc.net®. Direnc.net - Türkiye'nin En Büyük Elektronik Komponent Satış Sitesi [online]. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.direnc.net/75-1-mikro-metal-reduktorlu-6v-dc-motor-hp-pololu-2361-en>
- [6] GM37-3530. DC Gear Motor, Stepper Gear Motor ,Brushless Gear motors [online]. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <http://www.ttmotor.com/productshow.php?sid=208&id=140>
- [7] 12v Motor Geared Reductor Gm37-3530 - Buy Motor Geared, Geared Reductor Motor, 12v Dc Gear Motor Product on Alibaba.com. Alibaba.com: Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace [online]. Copyright © [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/12v-motor-geared-reductor-GM37-3530_60254346662.html
- [8] Pololu - 180:1 Mini Plastic Gearmotor, 90° 3mm D-Shaft Output. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 21.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1593>
- [9] X-NUCLEO-IHM04A1 - Dual brush DC motor driver expansion board based on L6206 for STM32 Nucleo - STMicroelectronics . [online]. Copyright © 2021 STMicroelectronics [cit. 21.04.2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-ihm04a1.html>
- [10] L6206 - DMOS dual full bridge driver - STMicroelectronics . [online]. Copyright © 2021 STMicroelectronics [cit. 22.04.2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/motor-drivers/l6206.html>
- [11] Pololu - Zumo Robot for Arduino (Assembled with 75:1 HP Motors). Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 22.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2510>
- [12] Pololu - DRV8835 Dual Motor Driver Carrier. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 22.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2135>
- [13] Pololu - DRV8833 Dual Motor Driver Carrier. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 22.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2130>
- [14] X-NUCLEO-IHM12A1 - Low voltage dual brush DC motor driver expansion board based on STSPIN240 for STM32 Nucleo - STMicroelectronics . [online]. Copyright © 2021 STMicroelectronics [cit. 23.04.2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-ihm12a1.html>

- [15] Pololu - QTR-8A Reflectance Sensor Array. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 23.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/960>
- [16] Pololu - Zumo Reflectance Sensor Array. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 23.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1419/resources>
- [17] NUCLEO-F411RE - STM32 Nucleo-64 development board with STM32F411RE MCU, supports Arduino and ST morpho connectivity - STMicroelectronics . [online]. Copyright © 2021 STMicroelectronics [cit. 28.04.2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f411re.html>
- [18] Pololu 3pi Robot. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 29.04.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/975>
- [19] AlphaBot2 Robot Building Kit Based on BBC micro:bit (optional). Waveshare Electronics [online]. [cit. 05.05.2021]. Dostupné z: <https://www.waveshare.com/alphabot2-for-micro-bit.htm?sku=15401>
- [20] Codey Rocky | Makeblock - Global STEAM Education Solution Provider. Makeblock® | Home of STEM Toys, Robot Kits, Laser Cutters for Kids & Makers. [online]. Copyright © 2021 Makeblock All Rights Reserved. [cit. 05.05.2021]. Dostupné z: <https://www.makeblock.com/steam-kits/codey-rocky>
- [21] Codey Rocky Makeblock: robot éducatif programmable. Robots jouets, robots éducatifs et robots ménagers - Robot Advance [online]. [cit. 06.05.2021]. Dostupné z: <https://www.robot-advance.com/art-codey-rocky-robot-makeblock-2328.htm>
- [22] TrueSTUDIO - A powerful eclipse-based C/C++ integrated development tool for your STM32 projects - STMicroelectronics . [online]. Copyright © 2021 STMicroelectronics [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/truestudio.html>
- [23] Bluetooth modul HC-05 TTL | laskarduino.cz. LASKARDUINO.cz | by Makers for Makers [online]. [cit. 12.05.2021]. Dostupné z: https://www.laskarduino.cz/bluetooth-modul-hc-05-ttl/?gclid=CjwKCAjw-qeFBhAsEiwA2G7NI40KxIYwMufPyRY36Ln34QoiMr_KJUvDBjxWE3UmKhv-6zwCHmengxoCyncQAvD_BwE
- [24] Pololu - Magnetic Encoder Pair Kit for Mini Plastic Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 20.05.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1523>
- [25] Pololu - Zumo 32U4 Robot. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 22.05.2021]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/category/170/zumo-32u4-robot>
- [26] GM37-3530-EN. DC Gear Motor, Stepper Gear Motor ,Brushless Gear motors [online]. [cit. 22.05.2021]. Dostupné z: <http://www.ttmotor.com/productshow.php?sid=208&id=141>
- [27] GlideWheel encoder for PowerFunction motors for Lego Mindstorms NXT MindSensors. [online]. Copyright © 2021 by Génération Robots. All Right Reserved. [cit. 23.05.2021]. Dostupné z: <https://www.generationrobots.com/en/401165-glidewheel-encoder-for-powerfunction-motors-for-lego-mindstorms-nxt-mindsensors.html>

Přílohy

Příloha A – PodvozkyRizeni.zip