



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Pokročilé řízení pohonů pro mobilní robotickou platformu a jejich laboratorní testování

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika
Autor práce: Bc. Lukáš Krčmář
Vedoucí práce: Ing. Pavel Jandura, Ph.D.





TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Advanced control of drives for mobile robotic platform and laboratory testing

Diploma thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 3902T005 – Automatic Control and Engineering Informatics
Author: Bc. Lukáš Krčmář
Supervisor: Ing. Pavel Jandura, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Krčmář**
Osobní číslo: **M15000196**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a inženýrská informatika**
Název tématu: **Pokročilé řízení pohonů pro mobilní robotickou platformu
a jejich laboratorní testování**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se se studií proveditelnosti autonomní mobilní platformy určené pro transport materiálu v průmyslových objektech.
2. Na základě studie navrhnete konkrétní pohon a trakční baterii. Pro tyto proveďte simulace dynamiky jízdy a spotřeby a případně proveďte korekce.
3. Pro daný pohon navrhnete řídicí systém a otestujte jej na laboratorním dynamometru, případně již na prototypu mobilní platformy.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 40–50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] JANDURA, Pavel, Josef ČERNOHORSKÝ a Aleš RICHTER. Electric Drive and Energy Storage System for Industry Modular Mobile Container Platform, Feasibility Study. In: 14th IFAC INTERNATIONAL CONFERENCE on PROGRAMMABLE DEVICES and EMBEDDED SYSTEMS
- [2] PISTOIA, G. Lithium-ion batteries: advances and applications. First edition. Amsterdam: Elsevier, 2014. ISBN 04-445-9513-9.
- [3] BANZI, Massimo. Getting started with Arduino. 2nd ed. Farnham: O'Reilly, 2011, 299 pages. ISBN 978-14-9309-879.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Jandura, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant diplomové práce: doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 15. května 2017

prof. Ing. Zdeněk Pliva, Ph.D.
děkan



Kolář
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2016

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

15.5.2017

Podpis:



Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří buď svou radou či odbornou konzultací v hodinách předmětů, nebo pouze „*nadhozením myšlenky*“ pro řešení problému pomohli. Především bych chtěl poděkovat Dr. Pavlu Jandurovi za jeho trpělivost při řešení problémů této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá pokročilým řízením elektrických pohonů pro mobilní robotickou platformu a jejím laboratorním testováním. Náplní této diplomové práce je návrh konkrétního pohonu a trakční baterie, dále pak tvorba samotného programu, který již řídí samotné servomotory a vytváří řídicí systém převádějící požadovaná data o směru a rychlosti mobilní platformy na jednotlivé signály pro servomotory. Tento servopohon musí mít dostačující výkon pro transport požadovaného materiálu požadované hmotnosti. Trakční baterie taktéž musí mít dostačující parametry s ohledem na dobu provozu na jedno nabití. Samozřejmostí jsou zabezpečovací prvky, například v podobě ultrazvukových čidel, bránící kontaktu s osobami či překážkami. Řízení mobilní platformy je prozatím za účelem laboratorního testování řešeno ovládním rádiovým dálkovým ovladačem. Řídicí systém mobilní platformy je uzpůsoben pro komunikaci s nadřazeným autonomním řízením.

Klíčová slova

Autonomní mobilní platforma, řídicí systém, měření se záznamem dat, trakční baterie, elektrický pohon

Abstract

This thesis deals with advanced control of drives for mobile robotic platform and its laboratory testing. The purpose of this thesis is design of concrete drive and traction battery and foremost the creation of the programme itself. This programme controls the servomotors themselves and creates control system which transfers desired data about direction and speed of the mobile platform to individual signals for servomotors. This servodrive must have sufficient power to be able to transport desired material with its desired weight. Traction battery must also have sufficient parameters with consideration of single charge operating time. Security features such as ultrasonic sensors, which prevent contact with people or obstacles are also included. So far, control of the mobile platform is for the purpose of laboratory testing solved with controls of radio for modellers. Control system of the mobile platform is adjusted for communication with superior autonomous control.

Key words:

Autonomous mobile platform, control system, measurement and data acquisition, traction battery, electric drive

Obsah

Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Abstrakt.....	7
Klíčová slova	7
Abstract.....	8
Key words:.....	8
Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek	12
Seznam použitých zkratk a výrazů.....	13
Seznam použitých veličin a jednotek.....	14
1 Úvod.....	15
2 Mobilní platformy.....	16
2.1 Dělení mobilních platforem	16
2.1.1 Diferenciální platforma.....	17
2.1.2 Trojkolová platforma	17
2.1.3 Automobilová platforma.....	18
2.1.4 Synchronní platforma	19
2.1.5 Platforma „Tříkolka“	19
2.1.6 Pásové platformy	20
2.1.7 Kráčející platformy	21
3 Elektrické pohony pro mobilní platformy	22
3.1 Stejnoseměrné motory	22
3.1.1 Části stejnosměrných motorů.....	22
3.1.2 Dělení stejnosměrných motorů	23
3.2 Střídavé motory.....	28
3.2.1 Části střídavých motorů.....	28
3.2.2 Dělení střídavých motorů.....	29
3.3 Stejnoseměrný motor jako pohon	32
3.4 Střídavý motor jako pohon.....	33
4 Mobilní platforma pro transport materiálu v průmyslových objektech.....	34

4.1	Návrh pohonu.....	35
4.1.1	Výpočet potřebné hnací síly	35
4.1.2	Výběr motoru.....	37
4.1.3	Motor Leadshine iSV-B23180.....	38
4.1.4	Ovládání motoru Leadshine iSV-B23180.....	39
4.1.5	Převodovka BR automation 8GP30-060.....	41
4.2	Návrh trakční baterie.....	42
4.2.1	Lithiová baterie Nano-tech 5000	43
4.2.2	Jednotka managementu baterie Tiny BMS.....	44
4.3	Návrh řídicího systému	46
4.3.1	Vývojová platforma Arduino Due	46
4.3.2	Rádiový dálkový ovladač s přijímačem Flysky fs-gt2b.....	50
5	Experiment a metody	51
5.1	Zapojení pohonů.....	51
5.2	Zapojení baterie a jednotky BMS	52
5.3	Tvorba programu.....	54
5.4	Seřizování regulátorů motorů.....	56
5.5	Měření účinnosti motoru a převodovky	57
6	Výsledky	59
6.1	Výsledky měření pohonu na dynamometru	59
6.2	Výsledek laboratorních testů platformy.....	61
7	Závěr	64
	Seznam použité literatury	65

Seznam obrázků

Obr. 1:	Druhy mobilních platforem	16
Obr. 2:	Prostředí mobilních platforem	16
Obr. 3:	Diferenciální platforma [1]	17
Obr. 4:	Upravené kolo platformy [2]	17
Obr. 5:	Trojkolová platforma [3]	18
Obr. 6:	Automobilová platforma [4]	18
Obr. 7:	Pásová platforma [6]	20
Obr. 8:	Pásová platforma nahrazená koly [7]	20
Obr. 9:	Kráčející platforma [8]	21
Obr. 10:	Stejnoseměrný motor [9]	22
Obr. 11:	Stejnoseměrný motor s cizím buzením a jeho charakteristiky [10]	23
Obr. 12:	Stejnoseměrný motor se sériovým buzením a jeho charakteristiky [10]	24
Obr. 13:	Stejnoseměrný motor s derivačním buzením a jeho charakteristiky [10]	25
Obr. 14:	Stejnoseměrný motor s kompaundním buzením a jeho charakteristiky [10] ..	26
Obr. 15:	Příklad zapojení BLDC motoru [10]	27
Obr. 16:	Střídavý motor [11]	28
Obr. 17:	Rotorová klec rotoru nakrátko	29
Obr. 18:	Momentová charakteristika asynchronního motoru	29
Obr. 19:	Zapojení motoru s kroužkovou kotvou [11]	30
Obr. 20:	Momentové charakteristiky motoru s kroužkovou kotvou [11]	30
Obr. 21:	Synchronní motor [11]	31
Obr. 22:	Použité zapojení motorů (se společnou zemí)	40
Obr. 23:	Leadshine iSV-B23180 [15]	40
Obr. 24:	Převodovka Leadshine 8GP30-060 [15]	41
Obr. 25:	Porovnání specifické hustoty uložené energie aktuálně dostupných technologií elektrochemických akumulátorů [12]	42
Obr. 26:	Nano-tech 5000 [17]	43
Obr. 27:	Tiny BMS [17]	44
Obr. 28:	Zapojení jednotky Tiny BMS [17]	45
Obr. 29:	Arduino DUE [13]	46

Obr. 30:	Rádiový dálkový ovladač Flysky fs-gt2b [16]	50
Obr. 31:	Schéma zapojení motoru	51
Obr. 32:	Oživování jednotky BMS	52
Obr. 33:	Základní menu programu jednotky BMS, stav jednotlivých článků	53
Obr. 34:	Menu programu jednotky BMS nastavující parametry článků baterie.....	53
Obr. 35:	Blokový diagram programu řídicího systému mobilní platformy	55
Obr. 36:	Průběh polohy hřídele motoru pohonu v čase při zastavení.....	56
Obr. 37:	Měření motoru s převodovkou na dynamometru Dynofit.....	57
Obr. 38:	Obrazovka osciloskopu při měření proudu motoru	58
Obr. 39:	3D graf účinnosti motoru s převodovkou	59
Obr. 40:	2D graf účinnosti motoru.....	60
Obr. 41:	2D graf účinnosti motoru s převodovkou	60
Obr. 42:	Mobilní platforma s konví ve startovací pozici	61
Obr. 43:	Záznam testovací jízdy	62
Obr. 44:	Mobilní platforma zajíždějící do cílové pozice mezi překážky.....	63

Seznam tabulek

Tabulka 1.	Štítkové vlastnosti Leadshine iSV-B23180	38
Tabulka 2.	Parametry Leadshine iSV-B23180.....	38
Tabulka 3.	Ovládací konektory motoru.....	39
Tabulka 4.	Parametry BR automation 8GP30-060.....	41
Tabulka 5.	Parametry Nano-tech 5000.....	43
Tabulka 6.	Parametry Tiny BMS	44
Tabulka 7.	Vlastnosti Arduino due	46
Tabulka 8.	Parametry Flysky fs-gt2b	50

Seznam použitých zkratk a výrazů

ACIM	AC Induction Motor; asynchronní motor s kotvou nakrátko
BLDC	Brushless Direct Current motor; bezkartáčová DC elektromotor
BMS	Battery Management System; management trakční baterie
CAN	Controller Area Network; komunikační sběrnice
I2C	Inter - Integrated Circuit
LED	Light - Emitting Diode
Li-Ion	Lithium-Ion technology; lithium-iontová technologie elchem. článků
Li-S	Lithium-Sulphur technology; lithium-síra technologie elchem. článků
LFP	Lithium Iron Phosphate; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LMO	Lithium Manganese Oxide; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LTO	Lithium Titanium Oxide; aktivní materiál katody Li-Ion článku
NCA	Nickel Cobalt Aluminium; aktivní materiál katody Li-ion článku
NMC	Nickel Manganese Cobalt; aktivní materiál katody Li-Ion článku
PMSM	Permanent Magnet Synchnous Machine; synchronní stroj s PM
PWM	Pulse Width Modulation; pulzně šířková modulace
SoC	State of Charge; výraz popisující stupeň nabití článku
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal asynchronous receiver / transmitter
USB	Universal Serial Bus

Seznam použitých veličin a jednotek

symbol	jednotka	popis veličiny
a	m s^{-2}	okamžité zrychlení vozidla
C _x	-	koeficient aerodynamického odporu vozidla
E	m	rameno valivého odporu
f	-	součinitel valivého odporu
F _h	N	hnací síla ve směru jízdy
F _n	N	kolmá síla mezi kolem a zemí
g	m s^{-2}	gravitační zrychlení
G	N	tíha vozidla
i	-	převodový poměr
m	kg	hmotnost
m _v	kg	hmotnost platformy včetně nákladu
M _k	Nm	hnací moment platformy
M _m	Nm	točivý moment na hřídeli motoru
M _{kolo}	Nm	hnací moment na kole
O _a	N	odporová síla způsobená zrychlením vozidla
O _f	N	odporová síla způsobená suchým a valivým třením
O _s	N	odporová síla způsobená náklonem trati
O _{vz}	N	odporová síla způsobená odporem vzduchu
r	m	poloměr kol
s	%	stoupání trati/vozovky
t	s	čas
v	m s^{-1}	okamžitá rychlost vozidla
W	Wh	energie uložená v akumulátoru
α	°	sklon trati/vozovky
η	-	mechanická účinnost

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je vytvořit funkční prototyp mobilní platformy pro transport materiálu v průmyslovém prostředí. Tato mobilní platforma musí mít dostatečný tažný výkon společně s dobou provozu na jedno nabití trakční baterie. Podvozek mobilní platformy musí být schopen provozu v podmínkách průmyslového provozu, především odolný vůči znečištění na podlahách provozu a taktéž musí mít dobré adhezní vlastnosti na požadovaném povrchu.

Stěžejní problematikou je řízení pohonů mobilní platformy, konkrétně dvou motorů diferenciálního podvozku. Řídicí systém řízení platformy pro účely testování dostává povely od obsluhy skrze dálkovou rádiový dálkový ovladač, toto řešení v budoucnu bude nahrazeno autonomním řízením celé mobilní platformy.

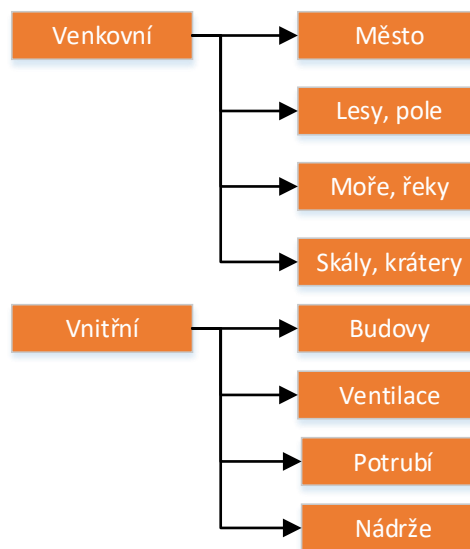
Součástí práce je samozřejmě návrh a zapojení trakční baterie včetně vlastní BMS jednotky zajišťující především balancování mezi jednotlivými články baterie při nabíjení baterie.

2 Mobilní platformy

2.1 Dělení mobilních platforem



Obr. 1: Druhy mobilních platforem

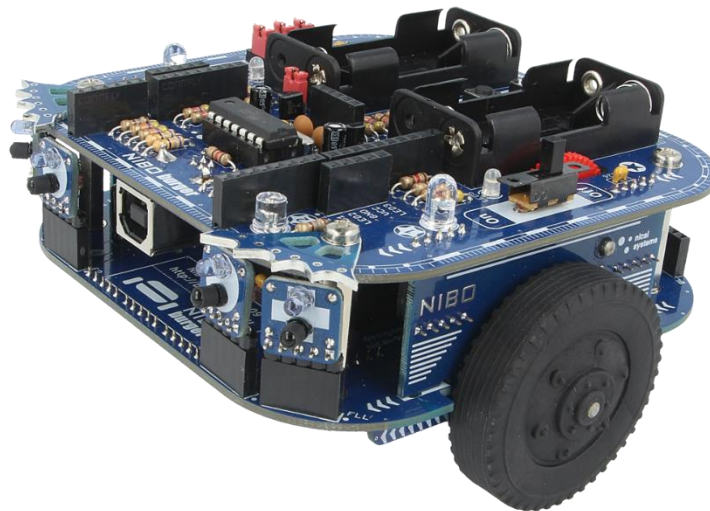


Obr. 2: Prostředí mobilních platforem

2.1.1 Diferenciální platforma

Tato mobilní platforma obsahuje 2 kola hnací, 1–2 kola pasivní (kulička, otočné kolečko) nebo třecí opěrné plošky. Pro větší zatížení jsou vhodná pouze 2 kola hnací společně s otočným kolečkem, principiálně shodným jako je kupříkladu u nákupního vozíku v obchodě.

Použití především ve vnitřních prostorech. Mezi základní vlastnosti patří nízká váha, nízká cena, jednoduchá a relativně přesná odometrie s integrační chybou, dobrá manévrovatelnost.



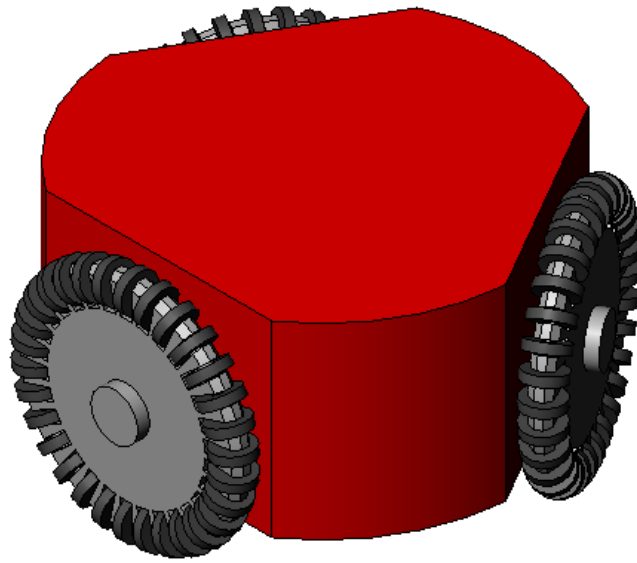
Obr. 3: Diferenciální platforma [1]

2.1.2 Trojkolová platforma

Platforma využívající ke své manévrovatelnosti v prostoru 3 aktivní vzájemně vůči sobě pootočená o 120° . Nejvíce obtížný směr pro tuto platformu je směr přímý, jelikož při něm dochází ke značným třecím odporům o podlahu, nejvíce u kola, které je ke směru pohybu kolmé. Tento problém lze vyřešit tím, že jednotlivá kola budou mít dva stupně volnosti, například tím, že plášť těchto kol bude tvořen válečky.



Obr. 4: Upravené kolo platformy [2]



Obr. 5: Trojkolová platforma [3]

2.1.3 Automobilová platforma

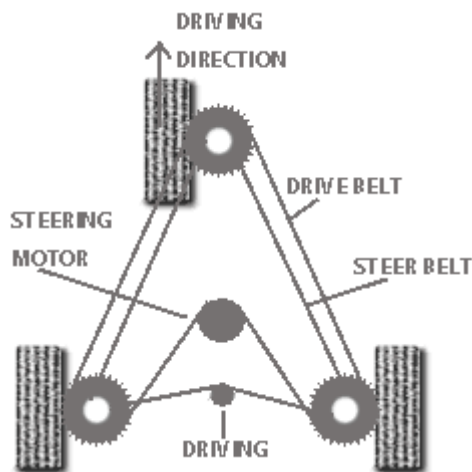
Automobilová platforma má nezávisle řízená přední kola, zadní kola jsou hnána pohonem. Tato platforma se využívá především u vyšších zatížení. Převážně je tato platforma využívána ve venkovních prostorách. Konstrukce automobilové platformy znemožňuje otáčení celé platformy na místě.



Obr. 6: Automobilová platforma [4]

2.1.4 Synchronní platforma

Obsahuje minimálně 3 kola se dvěma stupni volnosti. Všechna kola mají stejnou orientaci a rychlost. Tyto kola mohou být za cenu zvýšené mechanické složitosti mechanicky spojena, poté jsou zapotřebí pouze dva pohony, jinak je zapotřebí pro každé kolo využít pohony dva. U této platformy lze nezávisle řídit rychlost a směr při velmi dobré manévrovatelnosti. Použití především ve vnitřních prostorech.



Synchronní podvozek [5]

2.1.5 Platforma „Tříkolka“

Platforma založená na dětském vozítku, tříkolce, principiálně úplně totožná. Zadní dvě kola obvykle spojena se dvěma stupni volnosti (dopředu, dozadu). Přední kolo slouží k řízení. Tento způsob řízení znemožňuje rotaci na místě, hrozí nebezpečí uvážnutí v rozích a úzkých prostorech. Naproti tomu jde ale o snadnou a levnou konstrukci s nezávisle řízenou rychlostí a směrem s dobrou odozvědou.

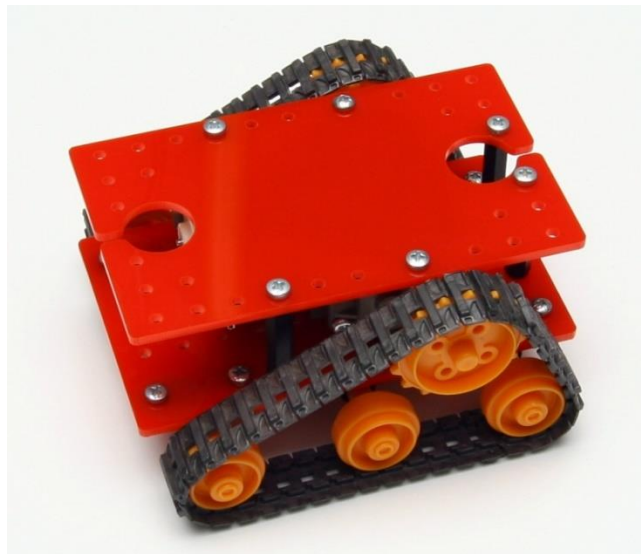


Platforma „tříkolka“ [5]

2.1.6 Pásové platformy

Pásové platformy jsou využívány především pro provoz ve venkovních prostorách v prostředích nevhodných pro kolové podvozky, jako jsou například skály, písek, bažiny a další. Vyznačují se lepší průchodností terénem. Při otáčení platformy na místě dochází k prokluzu pásů. Tento druh platformy je energeticky náročnější jak při zatáčení, tak i při jízdě rovně.

Pásové platformy bývají kvůli snížení energetické náročnosti nahrazovány koly, pásy nahrazeny dvěma koly blízko sebe na každé straně. Řízení této platformy je obdobné jako u diferenciální platformy. Taktéž jako u pásových platform u této platformy při zatáčení dochází ke smýkání a tím i k vyšší energetické spotřebě.



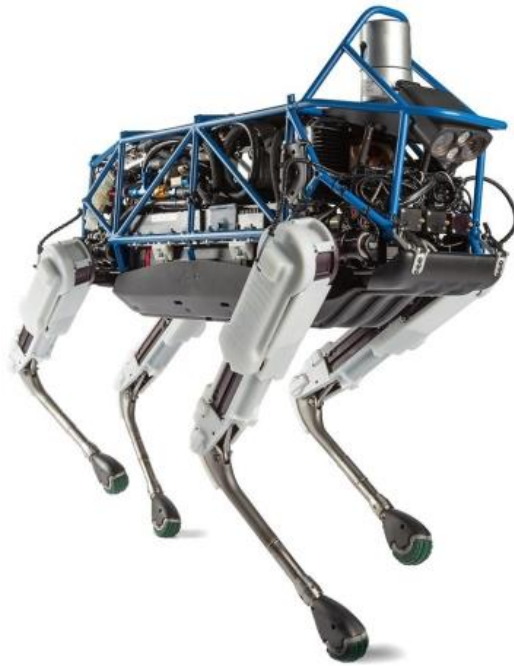
Obr. 7: Pásová platforma [6]



Obr. 8: Pásová platforma nahrazená koly [7]

2.1.7 Kráčející platformy

Tyto platformy mají své využití především ve více náročných vnitřních i venkovních prostorách. Mají lepší průchodnost terénem než platformy jmenované v minulých kapitolách. Jejich statická stabilita je průmětem těžiště uvnitř podstavy končetin s kontaktem terénem. Dynamická stabilita je mimo chodidla, například běžec, jezdec. Čím více nohou platforma obsahuje, tím má méně stupňů volnosti.



Obr. 9: Kráčející platforma [8]

3 Elektrické pohony pro mobilní platformy

3.1 Stejnosměrné motory

Stejnosměrné motory jsou svojí konstrukcí nejstarším typem elektrických motorů. Díky svým specifickým vlastnostem se nadále využívají. Tyto motory lze bez nutných úprav použít buď jako stejnosměrný motor nebo jako stejnosměrný generátor.

3.1.1 Části stejnosměrných motorů

Stator

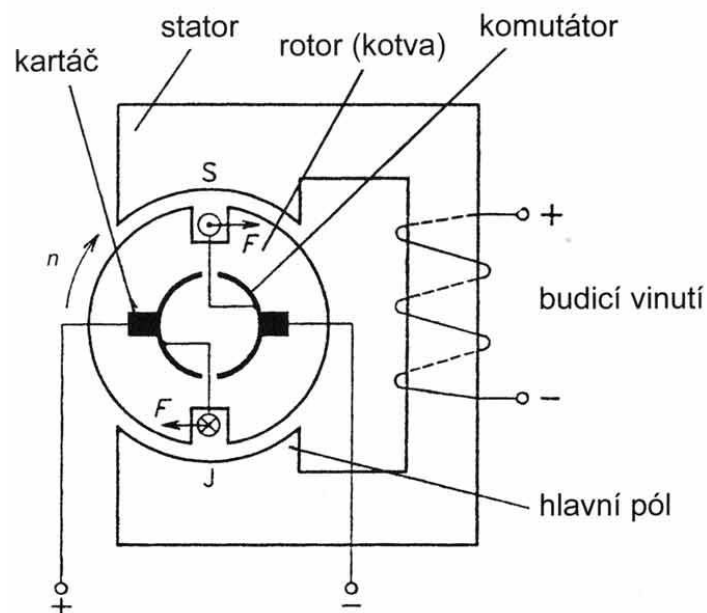
Pevná část motoru. Skládá se z magnetického obvodu, který může být tvořen elektrodynamickými plechy, v nichž jsou umístěny cívky, které tvoří elektromagnetické pole, nebo permanentními magnety.

Rotor

Rotující část motoru společně s hřídelí motoru. Rotor je tvořen elektrodynamickými plechy, v nichž jsou umístěny cívky napájené přes komutátor, které tvoří elektromagnetické pole.

Komutátor

Slouží k přenosu z pevné části motoru (statoru) na rotující část motoru (rotor) Skládá se z jednotlivých lamel, ve kterých jsou umístěny vývody jednotlivých cívek. Na tyto lamely se přivádí elektrický proud sběracími uhlíky, které jsou pevně umístěny na statoru a tlačeny pružinami.



Obr. 10: Stejnosměrný motor [9]

3.1.2 Dělení stejnosměrných motorů

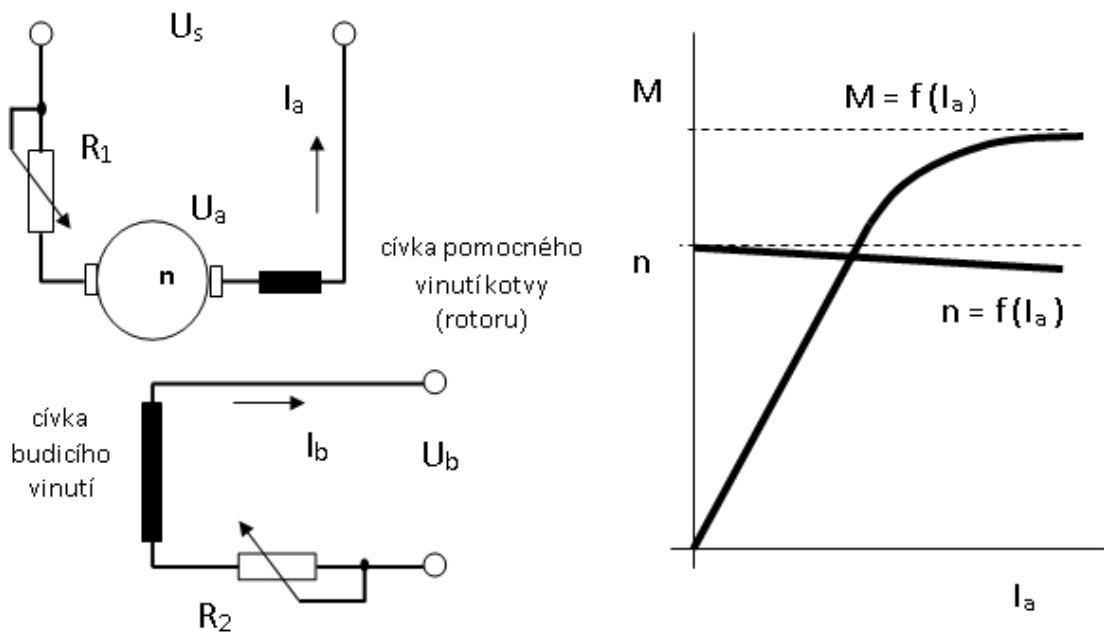
Stejnospměrný motor s cizím buzením

Statorové vinutí je napájeno jiným zdrojem elektrické energie než rotorové vinutí. Díky tomu je zaručeno stálé buzení a tím i velikost elektromagnetického pole statoru v prostoru rotoru. Magnetické pole rotoru je závislé pouze na vlastním napájení, není nijak vázané s napájením statoru. Tímto způsobem zapojení lze stejnosměrný motor nejjednodušeji regulovat.

Otáčky motoru jsou závislé pouze na velikosti napětí přivedeného na rotor. Moment na hřídeli motoru je závislý na proudu, který rotorem protéká. U motorů větších výkonů lze ke statorovému vinutí připojit pro rozběh sériově výkonový rezistor a tím lépe regulovat rozběh těchto motorů.

Momentová a otáčková charakteristika stejnosměrného motoru s cizím buzením jsou tvrdé. To znamená, že otáčky jsou s rostoucí zátěží téměř neměnné. Moment se zvyšuje až do stavu nasycení.

Změna směru otáčení je realizována pouze přepólováním vstupního napětí zdroje.



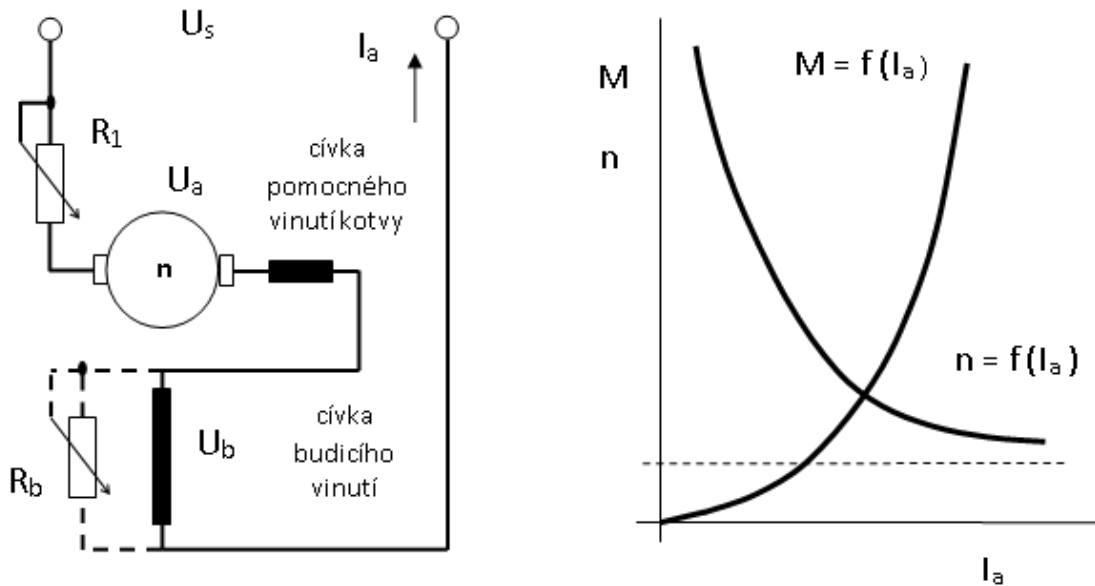
Obr. 11: Stejnospměrný motor s cizím buzením a jeho charakteristiky [10]

Stejnoseměrný motor se sériovým buzením

Statorové vinutí a rotorové vinutí je připojeno na stejný zdroj elektrické energie. Tímto zapojením dojde ke svázání buzení statorového magnetického pole a tím i jeho velikosti v prostoru rotoru s rotorovým magnetickým polem.

Rozběh tohoto zapojení motoru lze snáze regulovat připojením rezistoru v kotvě motoru. Otáčky lze nejlépe regulovat sériovým připojením rezistoru k vinutí statoru a rotoru. Zvětšením hodnoty tohoto rezistoru dojde k zeslabení statorového magnetického pole. Při rozběhu motoru musí mít tento rezistor nulovou hodnotu. Otáčky tohoto zapojení motoru jsou závislé na zátěži. Se zvětšující se zátěží klesají. Moment je závislý na proudu procházejícím rotorem.

Změna směru otáčení je realizována přepólováním statorového budícího vinutí v zapojení, čímž dojde ke změně smyslu statorového budícího toku.



Obr. 12: Stejnoseměrný motor se sériovým buzením a jeho charakteristiky [10]

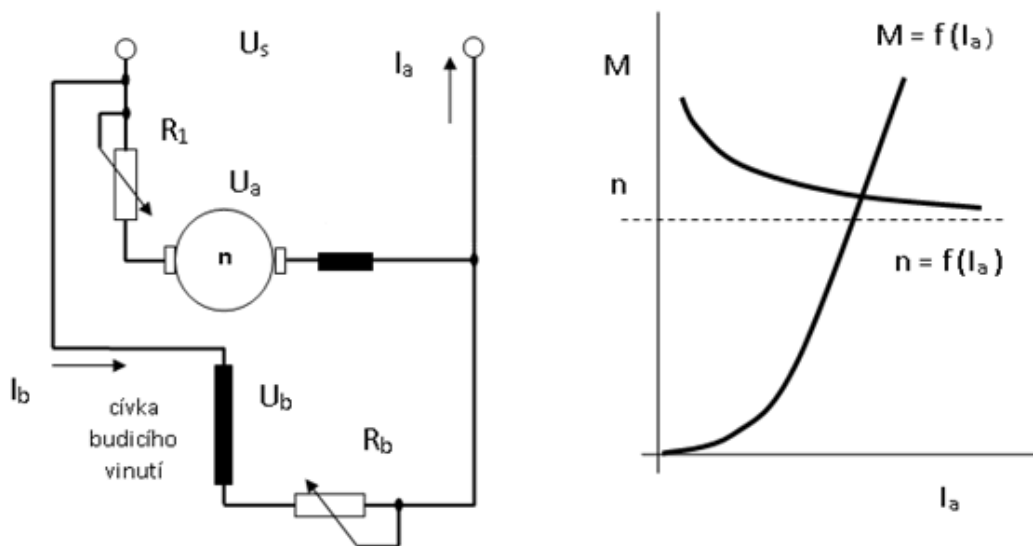
Stejnoseměrný motor s derivačním buzením

Statorové vinutí je zapojeno paralelně na totožný zdroj elektrické energie jako rotorové vinutí. Tímto zapojením je svázáno buzení statorového a rotorového magnetického pole a taktéž velikost elektromagnetického pole v prostoru rotoru.

Otáčky motoru jsou závislé na přivedeném napětí. Moment je závislý na proudu procházejícím rotorem. Pokud není statorový magnetický tok nasycen, otáčková charakteristika je hyperbolická, momentová charakteristika parabolická. Otáčky klesají se zvětšujícím se zatížením motoru. Ve stavu nasycení otáčky klesají minimálně. Rozběhový moment tohoto motoru je veliký. Použití například jako startér spalovacích motorů.

Regulace otáček motoru je nejjednodušší rezistorem připojeným sériově k vinutí statoru, tím dojde k zeslabení statorového magnetického pole.

Toto zapojení nelze použít v situacích, kdy je možné, že dojde k odpojení zátěže motoru na hřídeli, poté hrozí díky vlastnostem tohoto motoru přetočení motoru do vysokých otáček, které by přinejmenším nevydržela rotorová ložiska.



Obr. 13: Stejnoseměrný motor s derivačním buzením a jeho charakteristiky [10]

Stejnospěrný motor s kompaundním buzením

Satorové vinutí u tohoto typu zapojení musí být rozděleno na dvě části. Tyto dvě části satorového vinutí jsou připojeny sériově a paralelně na stejný zdroj elektrické energie jako rotorové vinutí. Buzení satorového magnetického pole a taktěž jeho velikost v prostoru rotoru je vázáno a obě části satorového vinutí.

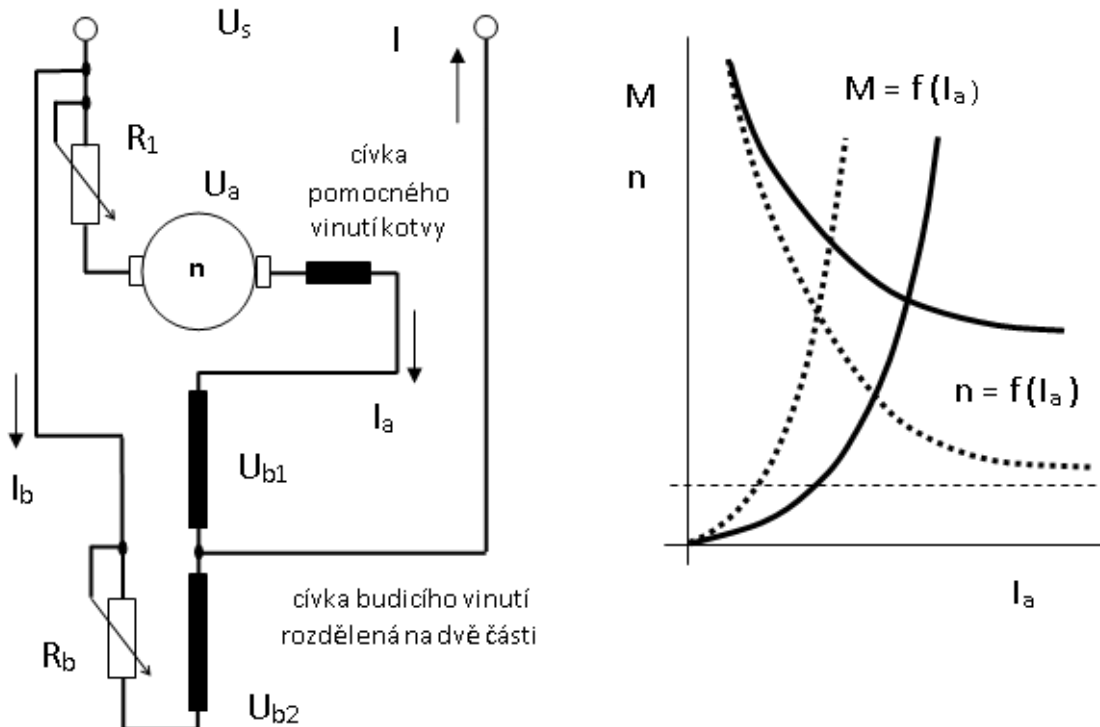
Momentová i otáčková charakteristika tohoto zapojení stejnosměrného motoru jsou podobní sériovému zapojení stejnosměrného motoru.

Pokud účinky magnetických polí částí satoru jsou souhlasné, má motor vyšší rozběhový moment a otáčky klesají méně se zvyšující se zátěží než derivační zapojení. Přetočení motoru při odpojení zátěže není tolik markantní.

Pokud účinky magnetických polí částí satoru působí proti sobě, má motor tvrdou otáčkovou charakteristiku – otáčky se zvyšující se zátěží klesají minimálně. Riziko přetočení motoru je vyšší, než u derivačního zapojení.

Regulace otáček je nejsnazší připojením rezistoru paralelně ke satorovému vinutí, tím dojde k zeslabení satorového magnetického pole.

Toto zapojení nelze použít v situacích, kdy je možné, že dojde k odpojení zátěže motoru na hřídeli, poté hrozí díky vlastnostem tohoto motoru přetočení motoru do vysokých otáček, které by přinejmenším nevydržela rotorová ložiska.



Obr. 14: Stejnospěrný motor s kompaundním buzením a jeho charakteristiky [10]

Stejnoseměrný kartáčový motor s cizím buzením permanentními magnety

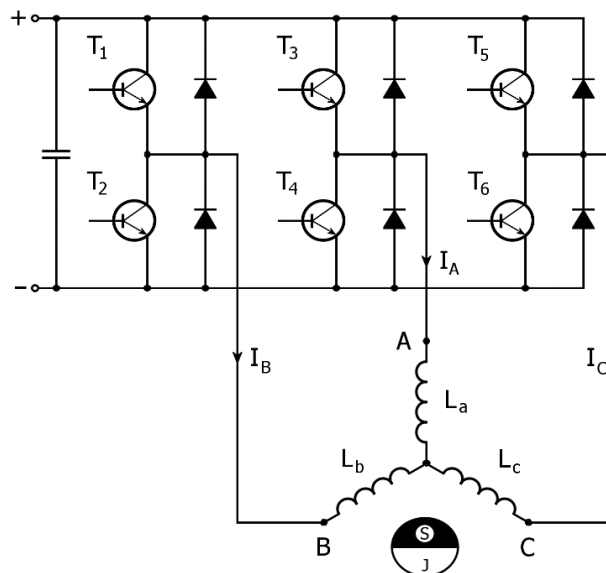
Jak již bylo řečeno v minulé kapitole, seskládá se stejnosměrný kartáčový motor s cizím buzením ze tří částí a to ze statoru, rotoru a komutátoru - kartáče.

Na statoru je umístěno statorové buzení v podobě permanentních magnetů. Rotor je tvořen elektrotechnickými plechy, ve kterých je umístěno rotorové vinutí cívek. Komutátor slouží k přenosu napájení na rotor a zároveň slouží k přepólování rotorových cívek během otáčení rotoru vůči statoru, bez čehož by nebyla funkce stejnosměrného motoru možná. Komutátor lze také nazvat mechanickým usměrňovačem, jelikož při opačné funkci motoru, funkci dynama, při roztočení motoru externí silou motor dodává elektrický stejnosměrný proud.

Elektronicky komutovaný stejnosměrný BLDC motor s cizím buzením permanentními magnety

Oproti stejnosměrnému kartáčovému motoru s cizím buzením permanentními magnety má tento motor magnety umístěny na rotoru. Díky tomu, že statorové vinutí je komutováno elektronicky za pomoci speciální řídicí elektroniky, která snímá polohu otočení hřídele motoru a podle úhlu otočení hřídele dochází ke spínání napětí jednotlivých cívek, není zapotřebí komutátor.

Princip je tedy založen na periodickém střídání polaritý stejnosměrného napájecího napětí při pootočení o 60° hřídelí. Otáčení hřídele je ve většině případů prováděno pomocí halových sond umístěných na statoru, vůči sobě pootočených o 60° . Rychlost otáčení těchto motorů je řízena PWM modulací napájecího napětí, tedy střední hodnotou napájecího napětí.



Obr. 15: Příklad zapojení BLDC motoru [10]

3.2 Střídavé motory

3.2.1 Části střídavých motorů

Stator

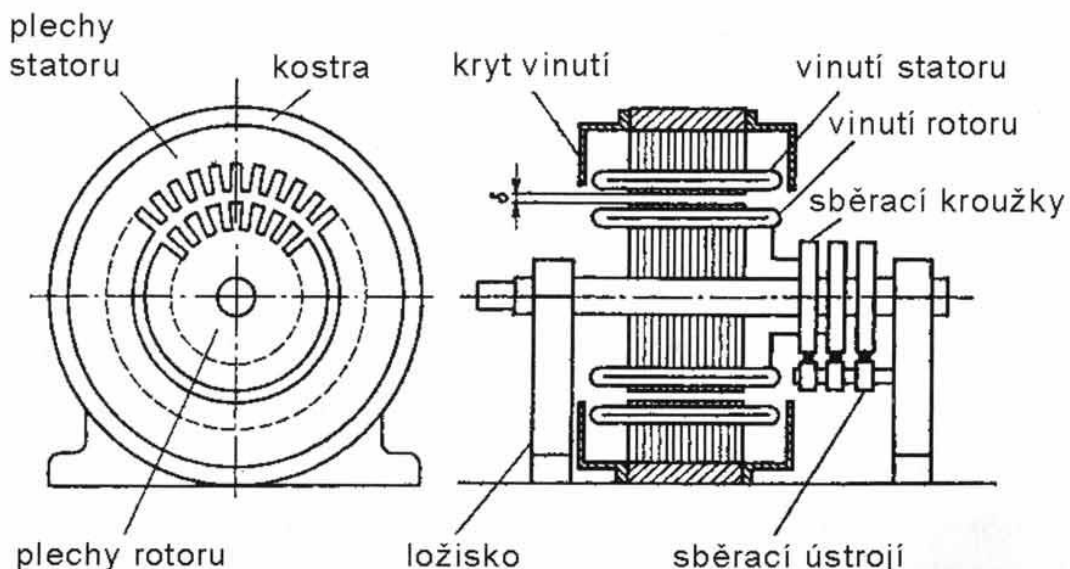
Střídavé motory jsou napájeny střídavým elektrickým napětím, tím pádem stator musí být tvořen elektrodynamickými plechy. Podle konstrukce motoru jsou statory uzpůsobeny pro napájení jednofázovým napětím či třífázovým napětím. Stator slouží k vytvoření rotačního magnetického pole uvnitř motoru.

Rotor

Rotor střídavých motorů může být tvořen dle typu motoru rotorovou klecí, permanentními magnety či elektrodynamickými plechy, v nichž jsou umístěny cívky.

Kroužkové sběrače

Tato komponenta střídavých motorů je použita pouze u některých typů motorů jako například asynchronní motor s kroužkovou kotvou či synchronní motor.



Obr. 16: Střídavý motor [11]

3.2.2 Dělení střídavých motorů

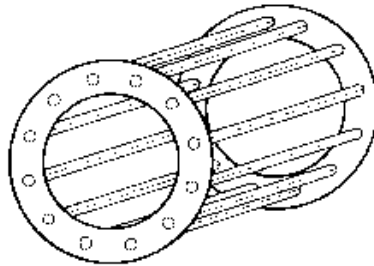
Asynchronní motor (s kotvou nakrátko)

Stator tvořen z nosného krytu motoru, svazku statorových plechů a statorového vinutí, které je vyvedeno na svorkovnici.

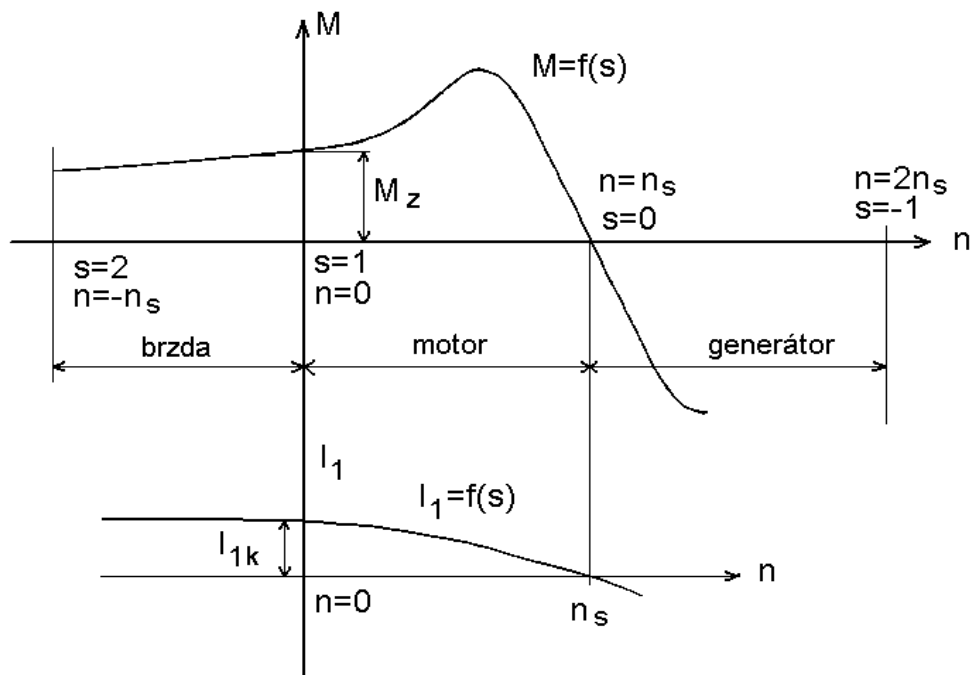
Rotor sestává z rotorových plechů, které jsou nasazeny na hřídeli a z vodičů umístěných v drážkách rotoru. Tyto vodiče mohou být hliníkové či měděné tyčky, na čelních stranách spojeny zkratovacími kroužky. Tyto tyčky a zkratovací kroužky tvoří takzvanou rotorovou klec.

Přivedením napětí na statorové vinutí dochází k vytvoření rotačního magnetického pole statoru. Toto magnetické pole indukuje napětí v rotorovém vinutí. Napětí indukované v rotorovém vinutí zapojeném nakrátko vyvolá rotorový proud, následně začne rotor být unášen točivým magnetickým polem.

Otáčky rotoru jsou ve skluzu vůči rotačnímu magnetickému poli statoru. (3–8 %)



Obr. 17: Rotorová klec rotoru nakrátko



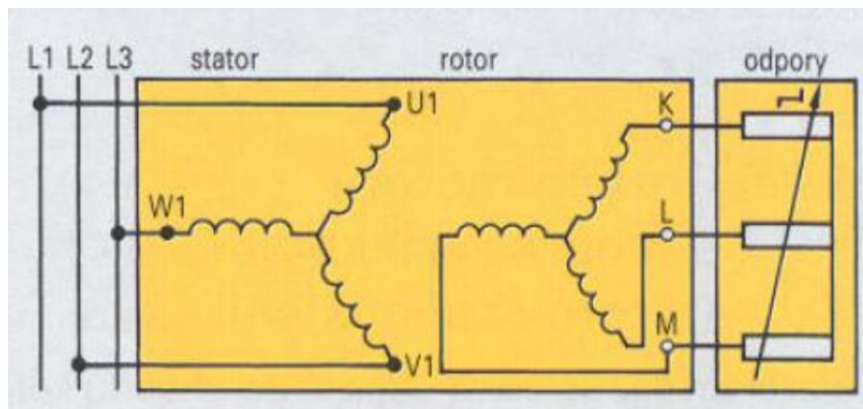
Obr. 18: Momentová charakteristika asynchronního motoru

Motor s kroužkovou kotvou

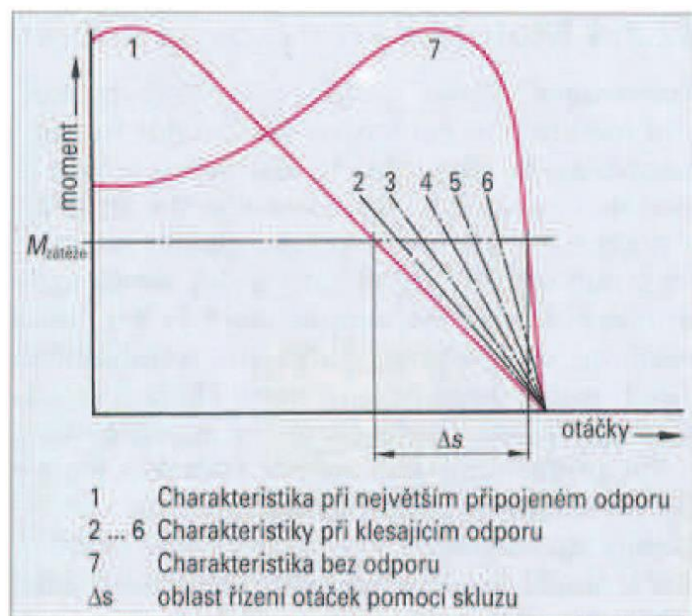
Stator je obdobně jako motor s kotvou nakrátko tvořen z nosného krytu motoru, svazku statorových plechů a statorového vinutí, které je vyvedeno na svorkovnici.

Rotor motoru s kroužkovou kotvou je již ale oproti motoru s kotvou nakrátko odlišný. Na hřídeli rotoru je svazek elektrodynamických plechů. V tomto svazku je navinuto rotorové vinutí. Toto vinutí má ve většině případů tři cívky zapojené do hvězdy. Konce tohoto vinutí jsou připojeny na sběrací kroužky. Přes tyto kroužky jsou připojeny rezistory sloužící pro rozběh a především pro regulaci otáček rotoru.

Vlastnosti motoru s kroužkovou kotvou zapojenou nakrátko jsou totožné s motory s kotvou nakrátko.



Obr. 19: Zapojení motoru s kroužkovou kotvou [11]



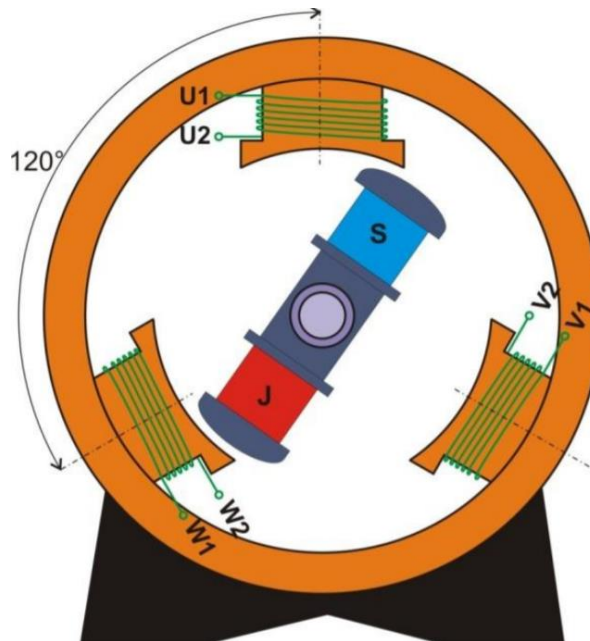
Obr. 20: Momentové charakteristiky motoru s kroužkovou kotvou [11]

Synchronní motor

Stator je obdobně jako motor s kotvou nakrátko tvořen z nosného krytu motoru, svazku statorových plechů a statorového vinutí, které je vyvedeno na svorkovnici.

Kotva může být složena ze železného jádra, to je buď masivní či složené ze svazku plechů a budícího vinutí napájeného přes sběrací kroužky, stejnosměrným napětím. O kotvě synchronního motoru lze říci, že je to elektromagnet mající stejný počet pólů jako stator motoru. Pro menší výkony jsou místo rotorového vinutí použity permanentní magnety.

Synchronní motor taktéž jako motor s kotvou nakrátko vytváří na statoru rotační magnetické pole, které vzájemnou interakcí s magnetickým polem roztočí kotvu. U tohoto typu motoru se rotor točí synchronními otáčkami, díky tomu, že napětí na kotvě není indukováno ze statorového vinutí a tudíž není pro indukci napětí zapotřebí skluzu otáček rotoru vůči statoru „Elektromagnetické pole rotoru je vtaženo do rotačního magnetického pole statoru“.



Obr. 21: Synchronní motor [11]

3.3 Stejnoseměrný motor jako pohon

Stejnoseměrné motory díky svým vlastnostem jsou využívány především pro aplikace vyžadující menší provozní výkony. Jejich hlavní předností jsou například vysoké rozběhové momenty, čehož je využito například u rozběhových startovacích motorů pro spalovací motory.

Pohony se stejnosměrnými motory byly dříve díky své jednoduchosti regulace řízení otáček využívány ve velkém množství. Nyní jsou již ale díky své mechanické složitosti a tudíž i zdatně vyšším pořizovacím nákladům vytlačovány motory střídavými, které jsou mechanicky zdatně jednodušší, i přes to, že k regulaci je zapotřebí složitější aparát, frekvenční měnič, než u motorů stejnosměrných.

Výhody stejnosměrných motorů

- Jednoduchost a univerzálnost využití. Například derivační a sériové zapojení stejnosměrných motorů lze využít s napájením stejnosměrným napětím i napětím střídavým nízké frekvence, obvykle síťové frekvence 50 Hz
- Libovolně dosažitelné otáčky, omezené pouze mechanickými vlastnostmi motoru
- Jednoduchá technika napájení z baterie

Nevýhody stejnosměrných motorů

- Jako hlavní nevýhoda stejnosměrných motorů je právem považován mechanické komutátor. Komutátor působí mechanické ztráty třením, má zdatně vysokou náchylnost k poruchám a náročnost pro údržbu, jiskření na komutátoru dochází k vytváření elektromagnetického rušení
- U sériového a derivačního zapojení stejnosměrných motorů je pro změnu směru otáčení zapotřebí přepólování rotou vůči statoru

Oblasti použití stejnosměrných motorů

- Vysokootáčkové stroje jako vrtačky, rozbrušovačky, mixéry, pily, vysavače
- Dopravní stroje s elektrickou trakcí jako tramvaje, lokomotivy, trolejbusy, metra
- Nízko výkonné stroje jako například mobilní stroje pro transport materiálu
- Jednoduché aplikace nízkých výkonů jako ventilátory, odsavače par

3.4 Střídavý motor jako pohon

Střídavé motory jsou díky svým vlastnostem využívány hlavně v aplikacích požadujících vyšší výkony. Přednostmi střídavých motorů jsou jednodušší konstrukce a vysoká spolehlivost provozu při nízké údržbě.

Ještě v minulém století byly střídavé motory využívány především v aplikacích nevyžadující složitou regulaci, jako například stacionární pohony zemědělských a průmyslových strojů. Střídavé motory jsou převážně využívány na výrobu elektrické energie.

Nyní již díky pokroku vývoje silové elektroniky střídavé motory vytlačují motory stejnosměrné, především díky vývoji frekvenčních měničů sloužících pro regulaci těchto motorů. Jejich využití již má uplatnění ve všech možných odvětvích, nejen průmyslu.

Výhody střídavých motorů

- Menší zastavěný prostor a tím i hmotnost a cena celého motoru
- Jednodušší konstrukce
- Menší moment setrvačnosti a s tím související lepší dynamické vlastnosti
- Vyšší spolehlivost
- Vyšší životnost
- Nižší nároky údržby
- Využití v prostředích nebezpečných na výbuch a agresivních prostředích

Nevýhody střídavých motorů

- Složitost regulace
- Nákladné prostředky řízení
- Potřeba frekvenčního měniče pro regulaci

4 Mobilní platforma pro transport materiálu v průmyslových objektech

Mezi základní požadavky pro mobilní platformu pro transport materiálu v průmyslových objektech patří dostatečný výkon, dojezd, manévrovatelnost. Podlahy průmyslových objektů, ve kterých má být platforma využívána mají hladký povrch s minimem nerovností, část z nich je povrchově upravena proti prokluzu.

Jako možná řešení platformem přichází k úvaze synchronní platforma, diferenciální platforma, automobilová platforma a platforma tříkolka.

Synchronní platforma vzhledem ke svým zbytečně složitým mechanickým nárokům při výrobě byla vyřazena.

Automobilová platforma má příznivé energetické nároky, avšak její manévrovatelnost neumožňuje rotaci platformy na místě což je další z požadavků pro platformu.

Platforma tříkolka má obdobné vlastnosti jako platforma automobilová, při použití řešení této platformy, kdy by bylo poháněno kole, které současně určuje i směr jízdy by byla možná i rotace na místě.

Díky vynikajícím vlastnostem byla vybrána platforma diferenciální, která všechny jmenované platformy ve všech směrech předčí.

Výhody diferenciální platformy

- Jednoduchá a robustní konstrukce
- Nízká váha
- Nízká pořizovací cena
- Relativně přesná odometrie s integrační chybou
- Minimální ztráty zatáčením
- Dobrá manévrovatelnost

4.1 Návrh pohonu

4.1.1 Výpočet potřebné hnací síly

Rovnováha sil ve směru jízdy

$$F_h = O_f + O_s + O_{vz} + O_a \quad (4.1)$$

F_h [N] Hnací síla ve směru jízdy

O_f [N] Valivý odpor

O_s [N] Odpor sklonu vozovky

O_{vz} [N] Aerodynamický odpor vzduchu

O_a [N] Odpor zrychlení

Vzhledem k nízkým rychlostem nepřesahující 10 km.h⁻¹ lze aerodynamický odpor vzduchu zanedbat. Dostaneme tedy vztah:

$$F_h = O_f + O_s + O_a \quad (4.2)$$

Valivý odpor

$$O_f = E \cdot \frac{F_n}{R} \quad (4.3)$$

E [m] Rameno valivého odporu

F_n [N] Kolmá síla mezi kolem a zemí

R [m] Poloměr kol

$E_1 = 0,0077$ m Rameno valivého odporu kol platformy

$E_2 = 0,002$ m Rameno valivého odporu kol nákladu

$F_{n1} = 300$ N

$F_{n2} = 400$ N

$R_1 = 0,062$ m Poloměr kol platformy

$R_2 = 0,05$ m Poloměr kol nákladu

$$O_f = 30,8 + 16 = 46,8 \text{ N} \quad (4.4)$$

Odpor sklonu vozovky

$$O_s = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.5)$$

m_v [kg] Hmotnost platformy včetně nákladu

$g \left[\frac{m}{s^2} \right]$ Tíhové zrychlení

$\alpha [^\circ]$ Sklon vozovky

$$m_v = 60 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$\alpha = 5,71^\circ$ Roven stoupání 10 %

$$O_s = 68,32 \text{ N}$$

Odpor zrychlení

$$O_a = O_{zp} + O_{zr} \quad (4.6)$$

$O_{zp} [N]$ Odpor zrychlení posuvné části

$$O_{zp} = m \cdot a \quad (4.7)$$

$O_{zr} [N]$ Odpor zrychlení rotujících částí

Vzhledem k nízké hmotnosti rotujících částí zanedbán, pak

$$O_a = O_{zp} = m \cdot a \quad (4.8)$$

$$O_a = 16,66 \text{ N}$$

Hnací síla ve směru jízdy

$$F_h = O_f + O_s + O_a \quad (4.9)$$

$$F_h = 131,78 \text{ N}$$

Hnací síla na kole

$$M_k = F_h \cdot r \quad (4.10)$$

$M_k [N]$ Hnací moment na kole

$F_h [N]$ Potřebná hnací síla

$R [m]$ Poloměr kola

$$M_k = 9,8835 \text{ Nm}$$

Vzhledem k tomu, že se jedná o diferenciální podvozek, tím pádem je hnací moment rozdělen na kola dvě. Pak hnací moment na každém kolem musí být:

$$M_{kolo} = 4,94 \text{ Nm}$$

4.1.2 Výběr motoru

U mobilní robotické platformy lze uvažovat o napájení pouze z trakční baterie bezpečného napětí, tedy do 60 V. Tento pohon musí mít též vysoký rozběhový moment. Regulace je požadována pouze otáčková.

Jak je viditelné dle vlastností jednotlivých druhů zapojení stejnosměrných motorů v kapitole stejnosměrné motory, na výběr jsou možné pouze dva druhy stejnosměrných motorů. Zaprvé je to stejnosměrný kartáčový motor s cizím buzením v podobě permanentních magnetů. Zadruhé je to elektronicky komutovaný stejnosměrný BLDC motor s cizím buzením permanentními magnety umístěnými na rotoru motoru.

Výhody BLDC motoru

- Jednoduché řízení
- Pohony tvořené těmito motory jsou levnější
- Vyšší výkonová hustota vůči velikosti a hmotnosti motoru
- Minimum mechanicky opotřebovávaných komponent – neobsahuje komutátor, jediná mechanicky opotřebovávaná komponenta při správném běhu motoru jsou rotorová ložiska

Nevýhody BLDC motoru

- Velké momentové pulsace při malých rychlostech otáčení
- Horší rovnoměrnost otáčení

Rozhodnutí o výběru motoru

Elektronicky komutovaný BLDC motor díky tomu, že neobsahuje komutátor, má nižší odpor při otáčení hřídelí. To je příznivé nejen při chodu motoru na vyšší výkon, ale i při využití pouze částečného výkonu motoru či při jízdě z kopce. Při malé hmotnosti mobilní robotické platformy se nevyplatí motorem rekuperovat energii zpět do trakční baterie, tudíž jednotka obsluhující motor nemusí obsahovat druhou sadu tranzistorů sloužících pro proud tekoucí směr od motoru do trakční baterie.

Toto vše mluví o výběru BLDC motoru jako pohonu pro mobilní robotickou platformu.

Vzhledem k tomu, že vypočtený potřebný krouticí moment na kolech mobilní platformy je roven hodnotě $M_{kolo} = 4,94 Nm$, po rozsáhlém průzkumu trhu a uvážení, bylo rozhodnuto o kombinaci BLDC motoru společně s převodovkou.

4.1.3 Motor Leadshine iSV-B23180

Leadshine iSV-B23180 je kompaktní integrovaný servopohon ovládaný obdélníkovým signálem. Typ motoru je BLDC. Obsahuje integrovaný polohový regulátor PID. Jeho hlavní využití je pro posuvy CNC strojů, svými vlastnostmi ale vyhovuje pro pohon mobilní platformy.

Tabulka 1. Štítkové vlastnosti Leadshine iSV-B23180

Jmenovitý výkon	180 W
Jmenovitý moment	0,6 Nm
Špičkový moment	1,5 Nm
Jmenovité otáčky	3000 RPM
Špičkové otáčky	4000 RPM
Hmotnost	1,54 kg

Tabulka 2. Parametry Leadshine iSV-B23180

Parametr	Min	Typ	Max	Jednotky
Vstupní napětí	20	36	50	VDC
Vstupní proud	0	-	6	A
Frekvence vstupu	0	-	200/500	kHz
Napětí ovládacího signálu	0	5	24	V
Proud ovládacího signálu	7	10	16	mA
Izolační odpor	100	-	-	MΩ

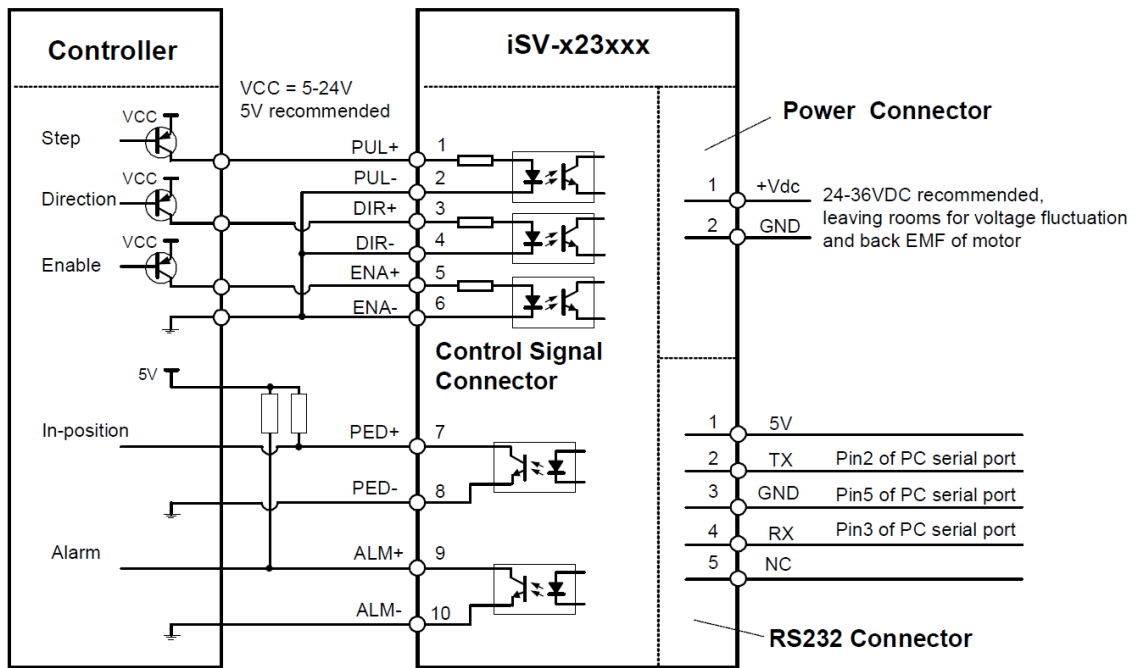
4.1.4 Ovládání motoru Leadshine iSV-B23180

Integrovaný polohový regulátor na motoru je ovládán obdélníkovým signálem. K tomu svorkovnice motoru obsahuje 3 vstupní a 2 výstupní porty. Vstupní porty slouží k ovládání rychlosti otáčení a směru. Výstupní porty jsou určeny pro signalizaci dojení motoru do polohy a druhý výstupní port slouží k signalizaci poruchových hlášení. Zapojení vstupních portů motoru je možných více, se společnou zemí, společným napájecím napětím a diferenciální zapojení.

Pro nastavování hodnot regulátoru slouží port s rozhraním RS232 umístěný na svorkovnici motoru. Pro odladění regulátoru dle soustavy, na kterou je motor mechanicky připojen slouží jednoduchá aplikace komunikující právě s motorem právě po rozhraní RS232. Aplikace bohužel neumožňuje výstup dat jakýkoliv způsobem, pouze je zobrazí na obrazovce PC, tím je obsluha při ladění regulátoru omezena pouze na prostředí dodávané výrobcem motoru, které umí pouze zobrazit odezvu na jednotkový skok.

Tabulka 3. Ovládací konektory motoru

Konektor ovládání motoru		
PUL	Pulse Signal	Vstup pro obdélníkový signál ovládání
DIR	Direction Signal	Vstup ovládání směru
ENA	Enable Signal	Vstup povolení otáčení motoru
PED	In-position Signal	Výstup nesoucí informaci o dojetí
ALM	Alarm Signal	Výstup signalizující poruchy motoru



Obr. 22: Použité zapojení motorů (se společnou zemí)



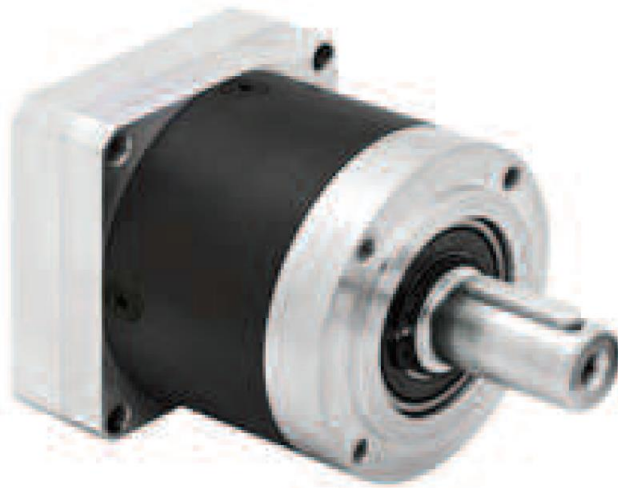
Obr. 23: Leadshine iSV-B23180 [15]

4.1.5 Převodovka BR automation 8GP30-060

Jedná se o planetovou redukční převodovku s převodovým poměrem 10:1. Výrobce udává účinnost se blíží 95 %. Převodovka je plně bezúdržbová s doživotní náplní. Vzhledem k mechanickému zapojení na mobilní platformě působí na hřídel převodovky minimální radiální i axiální síly, lze počítat s maximální životností převodovky 30 000 hodin.

Tabulka 4. Parametry BR automation 8GP30-060

Převodový poměr	10:1
Jmenovitý výstupní moment	15 Nm
Max. výstupní moment	24 Nm
Max. vstupní otáčky do 7,5	4500 ot/min
Max. vstupní otáčky do 15	4500 ot/min
Max. vstupní otáčky	13000 ot/min
Hlučnost	58 dB
Min. prac. teplota	-25 °C
Max. prac. teplota	90 °C
Třída krytí	IP 54
Hmotnost	0,9 kg



Obr. 24: Převodovka Leadshine 8GP30-060 [15]

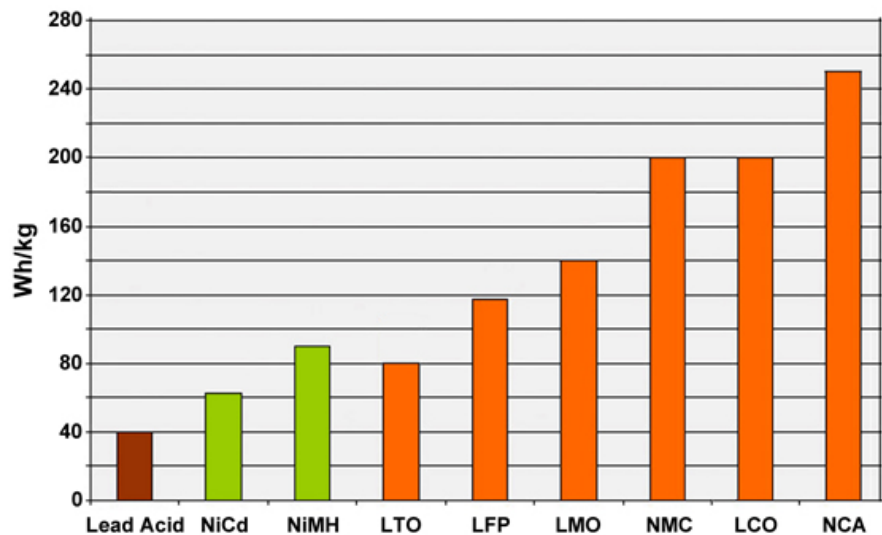
4.2 Návrh trakční baterie

Mobilní platforma musí být samozřejmě napájena z trakční baterie. Na výběr existuje velké množství technologií článků trakční baterie. Hlavními kritérii při výběru technologie článku jsou kapacita, maximální proud a samozřejmě cena.

Konkrétně u této mobilní platformy nebylo hleděno na hmotnost celé trakční baterie, jelikož baterie slouží taktéž jako závaží pro zlepšení adheze kol s podlahou. Hlavní požadavek byla požadovaná velikost spolu s jednoduchostí zapojení.

Pro zvýšení bezpečnosti a taktéž životnosti trakční baterie musí trakční baterie obsahovat jednotku BMS sloužící především k balancování mezi jednotlivými články baterie při nabíjení a ke sledování aktuální hodnoty nabití jednotlivých článků.

Po průzkumu trhu a všech možných baterií bylo rozhodnuto o výběru lithiové baterie technologie LCO-C.



Obr. 25: Porovnání specifické hustoty uložené energie aktuálně dostupných technologií elektrochemických akumulátorů [12]

Jak je vidět, tak v porovnání se zatím nejlepšími technologiemi bateriových článků NCA má technologie LCO-C srovnatelnou kapacitu při stejné hmotnosti.

Vlastnosti moderních lithiových akumulátorů

- Bez paměťového efektu
- Samovybíjení pouze přibližně 5 % za měsíc
- Jednoduché zapojení článků do série
- Vysoká životnost až 2000 cyklů
- Vysoké nabíjecí proudy
- Vysoké vybíjecí proudy

4.2.1 Lithiová baterie Nano-tech 5000

Jako základ trakční baterie byly použity dvě lithiové baterie o napětí 22,2 V sériovým zapojením šesti článků a 14,8 V sériovým zapojením čtyřech článků. Články mají kapacitu 5000 mAh. Trakční baterie vznikla sériovým spojením těchto dvou baterií. Jmenovité napětí vzniklé trakční baterie je rovno 37 V a kapacita 5000 mAh, tím pádem baterie uchovává výkon o hodnotě 185 Wh. Všechny články jsou pro účel připojení BMS jednotky vyvedeny vně baterie na konektor.

Tabulka 5. Parametry Nano-tech 5000

Kapacita	5000 mAh
Jmenovité napětí	37 V
Počet článků	10s
Vnitřní odpor	1,2 mΩ
Technologie článků	LCO-C
Vybíjecí proud jmenovitý	25C
Vybíjecí proud špičkový	50C
Nabíjecí proud	15C
Hmotnost	1513 g
Rozměry	167x49x93 mm



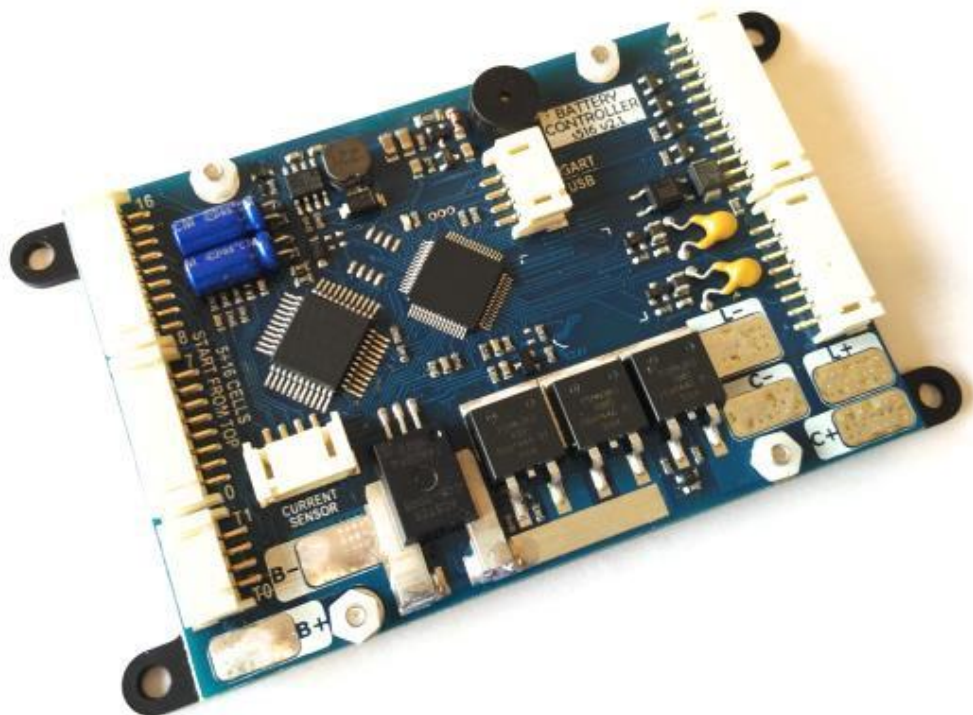
Obr. 26: Nano-tech 5000 [17]

4.2.2 Jednotka managementu baterie Tiny BMS

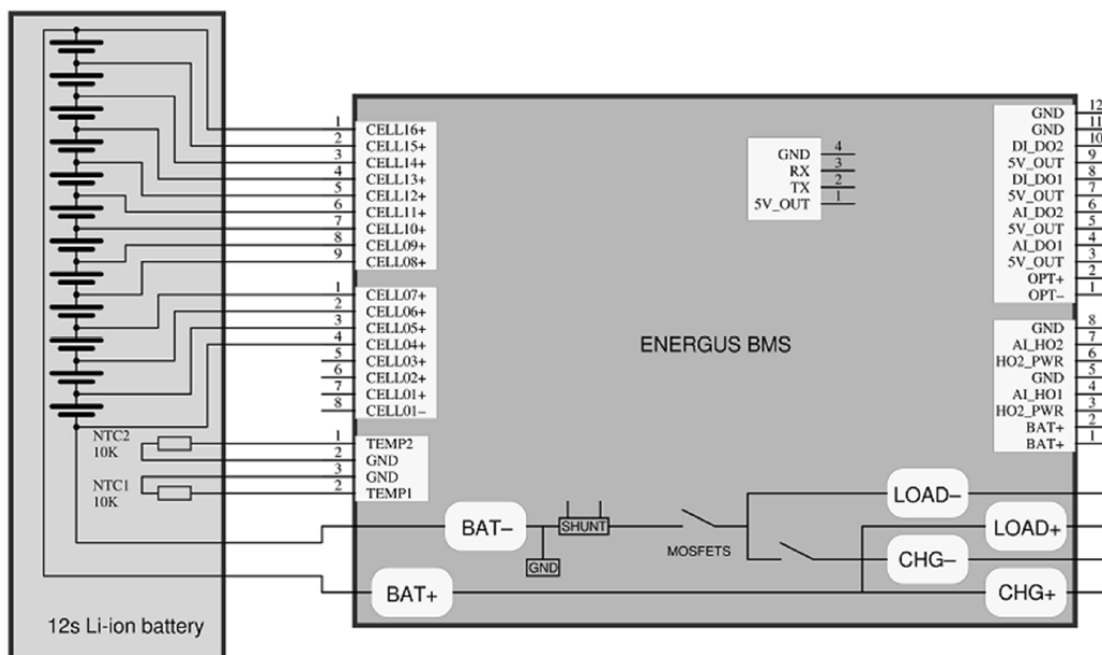
Tiny BMS je označení jednotky BMS obsluhující jednotlivé články baterie. Je určena pro lithiové články baterie. Hlavním úkolem této jednotky je vyrovnávání napětí jednotlivých článků baterie při nabíjení. Taktéž jednotka zasáhne v případě nízkého napětí článků baterie či v případě vadného článku výstup z trakční baterie odpojením. Jednotka obsahuje algoritmus sloužící k výpočtu aktuální kapacity článků. Komunikace s jednotkou je možná vícero způsoby, a to přes rozhraní UART, MODBUS, CAN, USB a Bluetooth.

Tabulka 6. Parametry Tiny BMS

Spínací proud	150 A
Napětí trakční baterie	9 – 75 V
Počet externích čidel teploty	2
Proudový snímač	S dvojnásobným rozsahem
Napětí článků	1 – 4,5 V
Nabíjecí proud	0,1 – 30 A
Balancovací proud	100 mA
Rozměry	113x65x11 mm
Rozhraní	UART, MODBUS, CAN, USB,



Obr. 27: Tiny BMS [17]



Obr. 28: Zapojení jednotky Tiny BMS [17]

Jak je vidět na schématu zapojení jednotky BMS, jednotlivé články trakční baterie se zapojují od kladného pólu baterie, Tiny BMS umí obsluhovat až 16 článků, pokud baterie má článků méně, vstupy do jednotky zůstanou nepřipojené. K jednotce je možné připojit externí čidlo teplo sloužící k monitorování teploty trakční baterie, čímž lze předejít úplnému zničení baterie.

Při připojování jednotlivých článků musí být dodržen následující postup: Nejprve připojit silové kontakty baterie BAT- a BAT+ a následně jednotlivé články. Při odpojování jednotky od baterie musí být nejprve odpojeny články a až poté silové kontakty baterie. Při nedodržení tohoto postupu může dojít k poškození vstupů mikroprocesoru umístěného na plošném spoji jednotky.

Jednotka integrovanými spínači tvořenými MOS-FET tranzistory je schopna sepnout maximální proud 150 A. Při požadavku na spínání většího proudu je zapotřebí použít externí relé a proudový snímač.

Porty AIDO1, AIDO2, DIDO1, DIDO2 mohou být použity jako vstupy či výstupy, jejich funkci lze nastavit za pomoci softwaru dodaného výrobcem po rozhraní USB. Funkce jsou omezené na ty, které jsou naimplementovány v programu jednotky, pouze lze jen určit jejich přiřazení příslušným portům. V této práci byla využita funkce zapnutí/vypnutí jednotky portem DIDO1.

Konektor sloužící pro nabíjení baterie musí být připojen na kontakty označené LOAD, výstup pro zátěž baterie je připojen na kontaktu CHG+, zem je společná s kontaktem baterie BAT-, kladný pól baterie musí být připojen ke kontaktu BAT+.

4.3 Návrh řídicího systému

4.3.1 Vývojová platforma Arduino Due

Vývojová deska s procesorem z rodiny ARM firmy Atmel, konkrétně SAM3X8E ARM Cortex-M3. Tato vývojová deska je první deskou Arduino, která využívá 32 bitový procesor. Součástí této desky je i čip komunikující po sběrnici USB, to zajišťuje jednoduché programování čipu pouze s pomocí USB kabelu. Výhodou desek Arduino je jednoduché programování a zapojení, nízká cena, mnoho návodů a rozšířená komunita uživatelů Arduina.



Obr. 29: Arduino DUE [13]

Tabulka 7. Vlastnosti Arduino due

Čip	Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3
Provozní napětí čipu	3,3 V
Vstupní napětí desky	7-12 V
Vstupní napětí desky	6-20 V
Počet digitálních vstupů/výstupů	54, z toho 12 podporuje PWM výstup
Počet analogových vstupních pinů	12
Počet analogových výstupních pinů	2
Max. proud všech vstupů dohromady	130 mA
FLASH	512 kB
SRAM	96 KB
Frekvence čipu	84 MHz
Velikost desky	101x53 mm

Vstupní a výstupní periferie

Arduino UNO obsahuje 54 digitálních pinů. Každý z nich lze použít jako vstup či výstup, pracující při logickém napětí 5 V. Každý pinem může téci proud o velikosti maximálně 15 mA, jak výstupní proud, tak i vstupní proud do digitálního pinu. Každý z pinů má pull-up rezistor o velikosti 20-50 k Ω , ve výchozím nastavení jsou pull-up rezistory odpojeny.

Speciální funkce pinů

- Serial (pin 0 – RX, pin 1 – TX) – použití pro sériovou komunikaci TTL, jsou spojeny s USB čipem
- Externí přerušeni (piny 18, 16, 14) – při požadované změně na těchto pinech lze aktivovat pouze požadovanou smyčku v programu (reakce na sestupnou, vzestupnou hranu signálu)
- PWM (piny 2-13) – tyto piny obsahují 8 bitový PWM mód pro výstup napětí z čipu
- SPI (pin 10 – SS, pin 11 – MOSI, pin 12 – MISO, pin 13 – SCK) – čip podporuje na těchto pinech hardwarovou komunikaci po SPI sběrnici
- Analogové vstupy (rozlišení 10bit) – ve výchozím nastavení je měřeno od 0 V (log 0) do 5 V (log 1)
- I2C (pin A4 (SDA), pin A5 (SCL)) – podpora komunikace po sběrnici I2C
- LED (pin 13) – k digitálnímu pinu 13 je na desce připojena SMD LED pro signalizaci
- AREF – pin pro externí referenční napětí používané u analogových vstupů
- RESET – slouží k resetování celého čipu externím signálem

Podporovaná komunikace

Arduino DUE obsahuje řadu zařízení pro komunikaci s okolím, jak s počítačem tak s dalšími Arduino deskami či jinými mikrokontroléry jiných výrobců.

UART TTL (5 V) – čip podporuje tuto sériovou komunikaci, na pinech 0 a 1

FTDI FT232RL – čip komunikuje s PC po této sériové lince po USB za pomoci vytvoření virtuálního portu COM, Arduino software umí tyto data číst

I2C – i tato komunikace je plně podporována čipem ATmega 328, za pomoci speciální knihovny programu

SPI - komunikace je plně podporována čipem ATmega 328, za pomoci speciální knihovny programu

Paměť

Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 má 512 KB FLASH paměť pro ukládání kódu programu, z toho 2 kB používá BOOTLOADER). Čip též obsahuje 96 kB SRAM a 32 kB EEPROM, tyto paměti lze číst i do nich zapisovat za pomoci knihovny EEPROM.

Napájení

Desku Arduino DUE lze napájet připojením micro-B USB kabelu, nebo neregulovaným externím napětím (6-20 V) připojeným na pin 30, jelikož na desce je obsažen stabilizátor napětí 78L05.

Napájení je možno externě stabilizovat (5 V) a připojit na pin 27.

Programování

K programování Arduino DUE je od výrobce vytvořen plně funkční a zdarma stažitelný software Arduino IDE. Čip Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 má již bootloader, který umožňuje programování čipu bez potřeby externího hardwarového programátoru, komunikace probíhá za použití protokolu STK500.

Čip na desce Arduina programuje pomocí speciálního Arduino programovacího jazyku (je založen na jazyku Wiring – podobný jazyku C). Projekty vytvořené na Arduinu mohou jednoduše komunikovat se softwarem na počítači.

Jak již bylo řečeno na začátku této kapitoly, tak je hodně rozšířená Arduino komunita, díky níž je možné problémy řešit přímo na webu. Díky této komunitě je vytvořeno mnoho knihoven pro Arduino. Již i samotní výrobci tyto knihovny vytvářejí ke svým součástkám. Stačí tedy pouze nahrát příslušnou knihovnu k tvořenému programu a používat ji jen jednoduchými funkcemi, tedy žádné složité programování. Největší kámen úrazu je najít knihovnu vyhovující požadované funkci. Knihovny jsou již vytvořeny téměř na vše (Sběrnice I2C, jedno vodičova sběrnice, komunikace s displeji různých druhů a mnoho dále)

Struktura programu

Základní struktura programovacího jazyka Arduino je poměrně jednoduchá a skládá se nejméně ze dvou částí, přesněji funkcí. Bloky příkazů v těle těchto dvou funkcí jsou ohraničeny složenými závorkami.

```
void setup ()
```

```
{ příkazy;
```

```
}
```

```
void loop()
```

```
{ příkazy;
```

```
}
```

Funkce `setup ()` je přípravná a provádí se jen jednou na začátku programu, funkce `loop()` je výkonná a provádí se neustále dokola. Pro správnou činnost programu je vždy nutné použít obě tyto funkce.

Funkce `setup ()` by měla být volána až po deklaraci všech proměnných na začátku programu. Tato funkce se používá například k nastavení pinů Arduina na vstup nebo výstup, nastavení parametrů sériové komunikace a podobných jednorázových akcí.

Po funkci `setup ()` následuje funkce `loop()`. Tělo této funkce obsahuje programový kód, který bude opakovaně prováděn v nekonečné smyčce, například čtení vstupů, nastavování výstupů, výpočty, atd. Tato funkce je jádrem všech programů Arduina a vykonává většinu činností.

Setup ()

Funkce `setup ()`, jak již bylo řečeno výše, se volá pouze jednou při spuštění programu. Používá se k inicializaci režimu jednotlivých pinů, k nastavení sériové komunikace apod. Tato funkce musí být v programu obsažena vždy, i když žádné inicializační příkazy neobsahuje.

```
void setup ()
```

```
{
```

```
pinMode(pin, OUTPUT); // nastav 'pin' na výstup
```

```
}
```

loop()

Po dokončení funkce `setup ()`, se začne neustále dokola provádět funkce `loop()`, jak její název (`loop = smyčka`) ostatně napovídá. Příkazy, obsažené v těle této funkce, jsou určeny k provádění veškeré činnosti Arduina.

[14]

4.3.2 Rádiový dálkový ovladač s přijímačem Flysky fs-gt2b

Jde o tříkanálový rádiový dálkový ovladač včetně přijímače určenou pro řízení modelů aut. Rádiový dálkový ovladač obsahuje integrovaný výměnný LCO-C akumulátor. Akumulátor svou kapacitou 800 mAh je váhově srovnatelný s 8 tužkovými bateriemi. Nabíjení konektorem micro USB. Dva kanály ovládané analogovými vstupy dálkového ovladače, volat a plyn, třetí kanál slouží k ovládání jednoduchých periférií tlačítkem, výstupem jsou dva stavy.

Tabulka 8. Parametry Flysky fs-gt2b

Pásmo	2,4-2,48 GHz
Počet kanálů	3
RF výkon	<20 dBm
Akumulátor LCO-C	3,7 V, 800 mA
Rozlišení	1024
Modulace	GFSK



Obr. 30: Rádiový dálkový ovladač Flysky fs-gt2b [16]

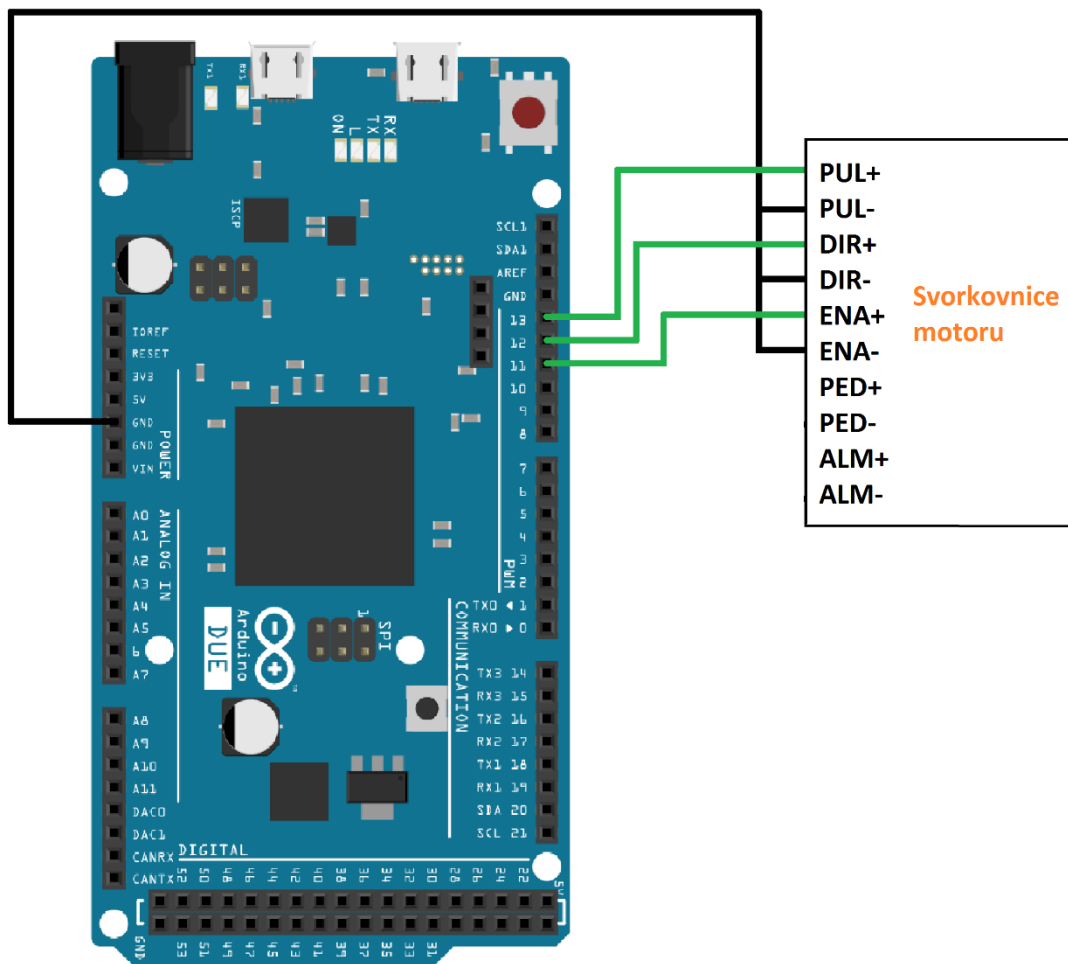
5 Experiment a metody

5.1 Zapojení pohonů

Zapojení motorů bylo provedeno v provedení se společnou kostrou. Piny PED, nesoucí informaci o dojetí motoru do polohy a ALM, sloužící ke hlášení o poruchách nebylo zapotřebí zapojit, jejichž funkce je prozatím zbytečná.

Připojeny byly pouze piny PUL, DIR a ENA.

Pin PUL je vstup pro obdélníkový signál ovládající otáčení motoru, DIR je vstup, na kterém závisí směr otáčení motoru a pin ENA povoluje otáčení motoru, pokud hodnota tohoto pinu je logická jednička, pak je motor blokován na otáčení.



Obr. 31: Schéma zapojení motoru

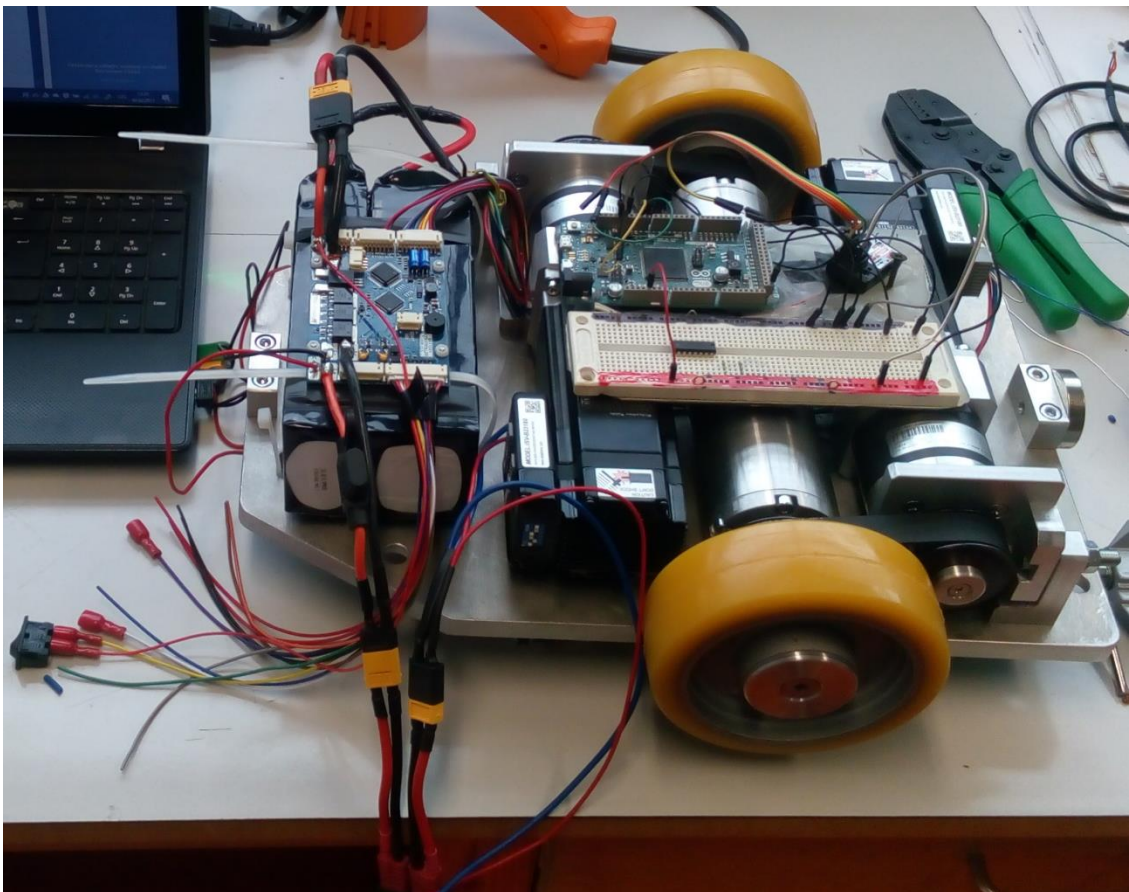
5.2 Zapojení baterie a jednotky BMS

Další fází bylo připojení napájení z trakční baterie. K tomu bylo zapotřebí oživit jednotku BMS. Dle pokynů výrobce musel být dodržen následující postup:

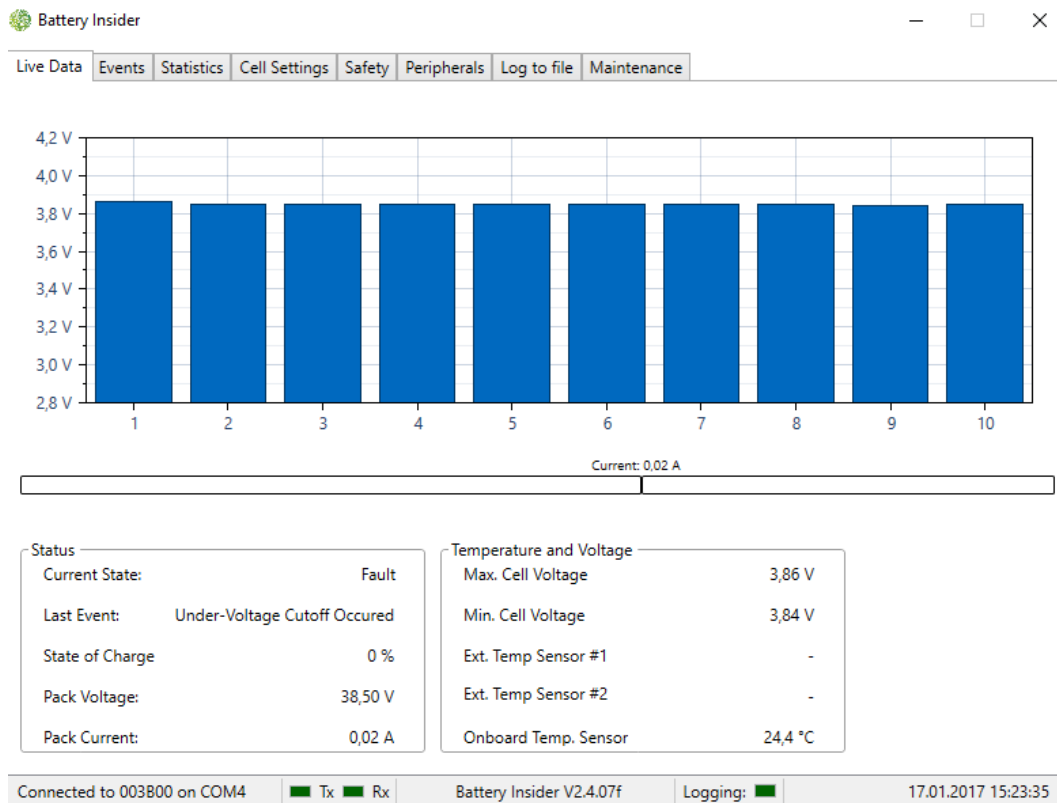
Nejprve připojit silové kontakty baterie BAT- a BAT+ a následně jednotlivé články. Při odpojování jednotky od baterie musí být nejprve odpojeny články a až poté silové kontakty baterie. Při nedodržení tohoto postupu může dojít k poškození vstupů mikroprocesoru umístěného na plošném spoji jednotky.

Díky tomu musí být baterie spojena s jednotkou BMS napřímo bez jakéhokoliv jištění, jinak by došlo k poškození jednotky BMS. Jištění, například tavnou pojistkou může být do obvodu vřazeno až za jednotku BMS.

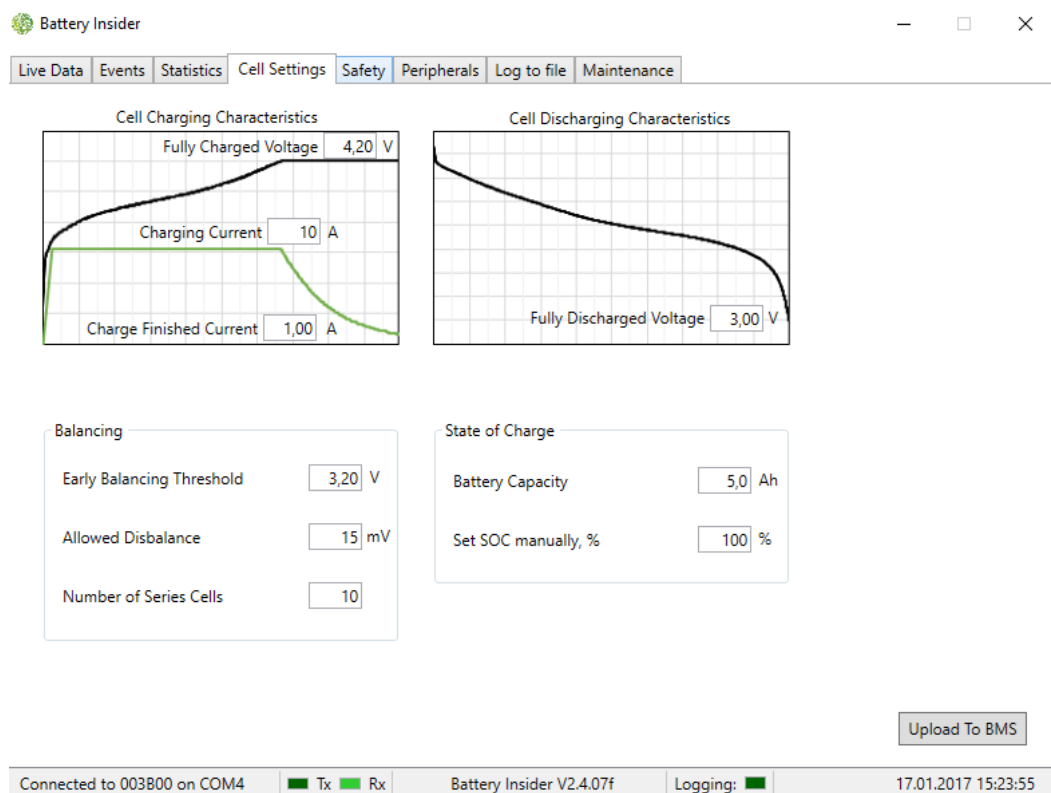
Součástí uvedení trakční baterie do provozu bylo i nastavení ovládání jednotky na požadovaný typ článků a nastavení vstupních periférií jednotky. Nejdůležitější periferie ovládání jednotky je ovládání jednotky spínačem sloužícím ke spuštění (připojení) výstupu jednotky a k uspání jednotky BMS



Obr. 32: Oživování jednotky BMS



Obr. 33: Základní menu programu jednotky BMS, stav jednotlivých článků



Obr. 34: Menu programu jednotky BMS nastavující parametry článků baterie

5.3 Tvorba programu

Program ovládající pohony byl tvořen od základních jednoduchých částí programu, které postupně rostly jak svou funkcí, tak i velikostí. Nejprve byl vytvořen generátor obdélníkového signálu, nezávislého na běhu hlavního programu, pro test funkčnosti celého zapojení. Následně bylo zapotřebí číst data od přijímače rádiového dálkového ovladače a následně je převést do vhodné číselné podoby. Spojením těchto dvou základních programů a jeho následující nadstavbou uživatelsky přívětivějšího ovládání vznikl řídicí systém ovládání pohonů mobilní platformy. Tento systém je uzpůsoben pro záměnu ovládání rádiovým dálkovým ovladačem vyšším systémem ovládání, jako například autonomní řízení.

Na následující stránce je vyobrazen blokový diagram programu mobilní platformy. Hlavní program slouží pouze ke komunikaci s PC, toto bylo zapotřebí pouze při odladování programu, pro běh samotného programu nemá využití.

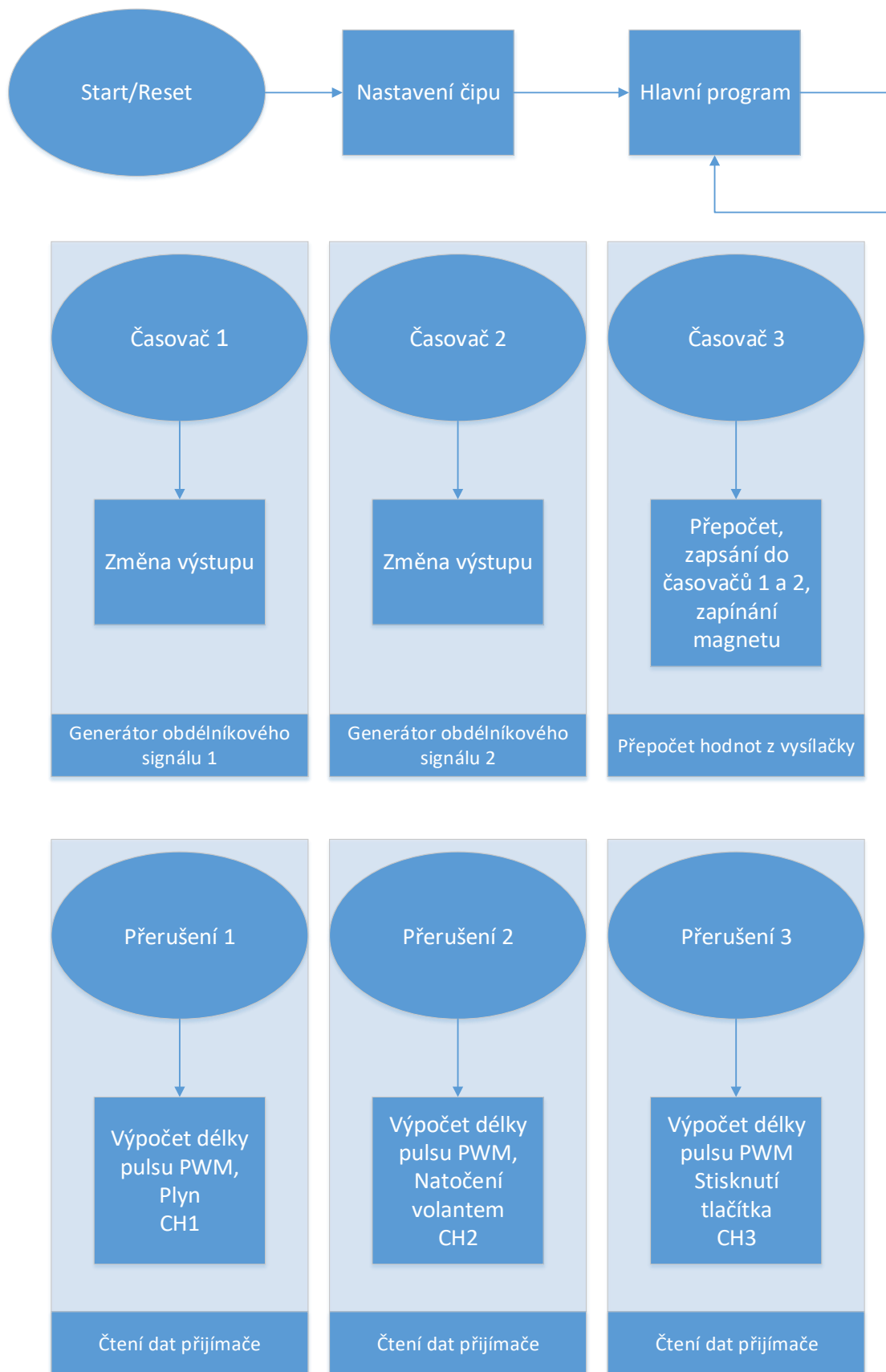
Zajímavostí programu je to, že najednou běží nezávisle na sobě 3 časovače a 3 přerušení. Díky rychlosti procesoru 84 MHz a tomu, že procesor běží na 64 bitové architektuře je běh těchto časovačů a přerušení nezávisle na sobě umožněn. Samozřejmostí je programové odladění běhu programu, aby nedocházelo ke kolizím.

Časovače 1 a 2 složí pro vytváření obdélníkového signálu ovládající rychlost otáčení motorů. Do hodnot registrů těchto časovačů zapisuje program běžící v časovači číslo 3, který se stará téměř o veškeré výpočty programu.

Přerušení 1, 2 a tři slouží k příjmu signálu PWM od přijímače rádiového dálkového ovladače. V programech těchto přerušení se pouze počítá délka pulsu PWM.

Jako nejtěžší část programu byla ta nejjednodušší, a to čtení signálu PWM od přijímače rádiového dálkového ovladače. Původní knihovny Arduino nepočítají s využitím výkonné desky Arduino Due pro takto triviální výpočty jako je čtení signálu PWM. Tyto knihovny byly pouze převzaty z jiných desek. Díky tomu, že procesor běží na vysoké frekvenci 84 MHz tak je schopen reagovat i na relativně krátké zvlnění signálu a tím dochází k vadnému čtení délky pulsu signálu PWM. Problém byl vyřešen velice krátkým zmražením reakce na vstupy přerušení.

Program je vložen na příloženém CD.

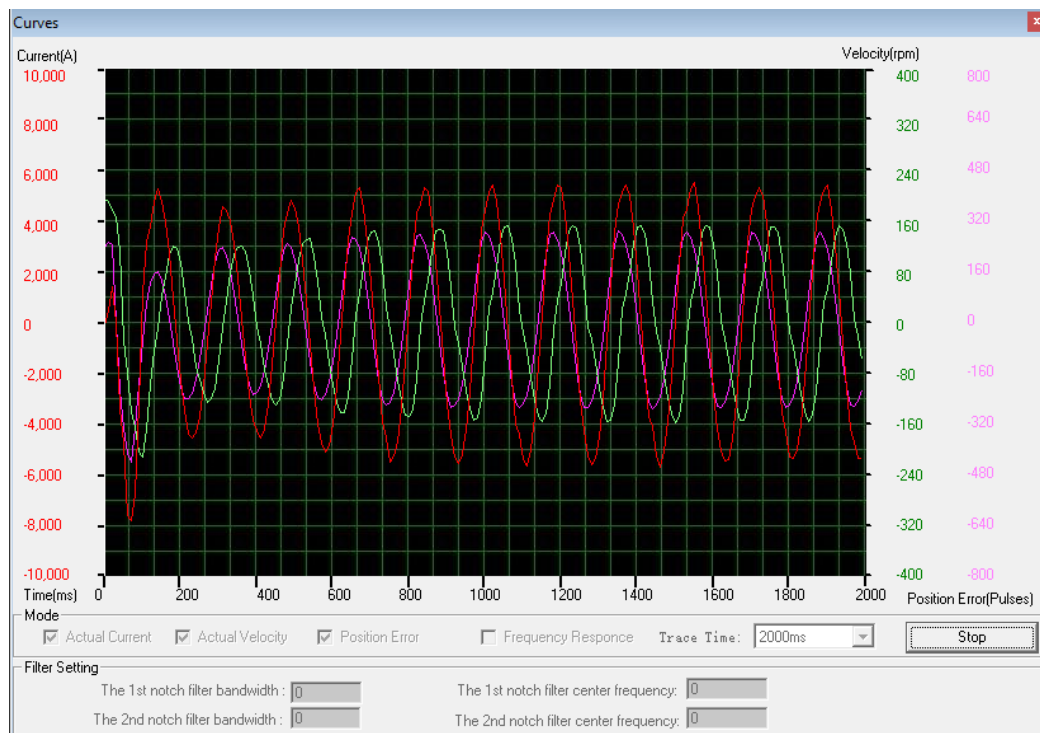


Obr. 35: Blokový diagram programu řídicího systému mobilní platformy

5.4 Seřizování regulátorů motorů

Během tvorby programu mobilní platformy a následném ladění toho programu se vyskytly závažné problémy s regulací pohonů. Přednastavené hodnoty PID regulátorů motorů od výrobce nebyly použitelné v kombinaci s mobilní platformou. Motory jsou pevně spojeny s převodovkou a následně přes drážkový řemen jsou spojeny s koly platformy. Veškeré vůle, především na drážkovém řemenu vychylovaly celý systém pohonu za mez stability regulace. Tím vznikaly rostoucí kmity pohonů při zastavení.

Po připojení a zprovoznění komunikace RS232 s regulátory motorů byly v prostředí dodaném výrobcem naměřeny následující průběhy polohy motorů v čase:



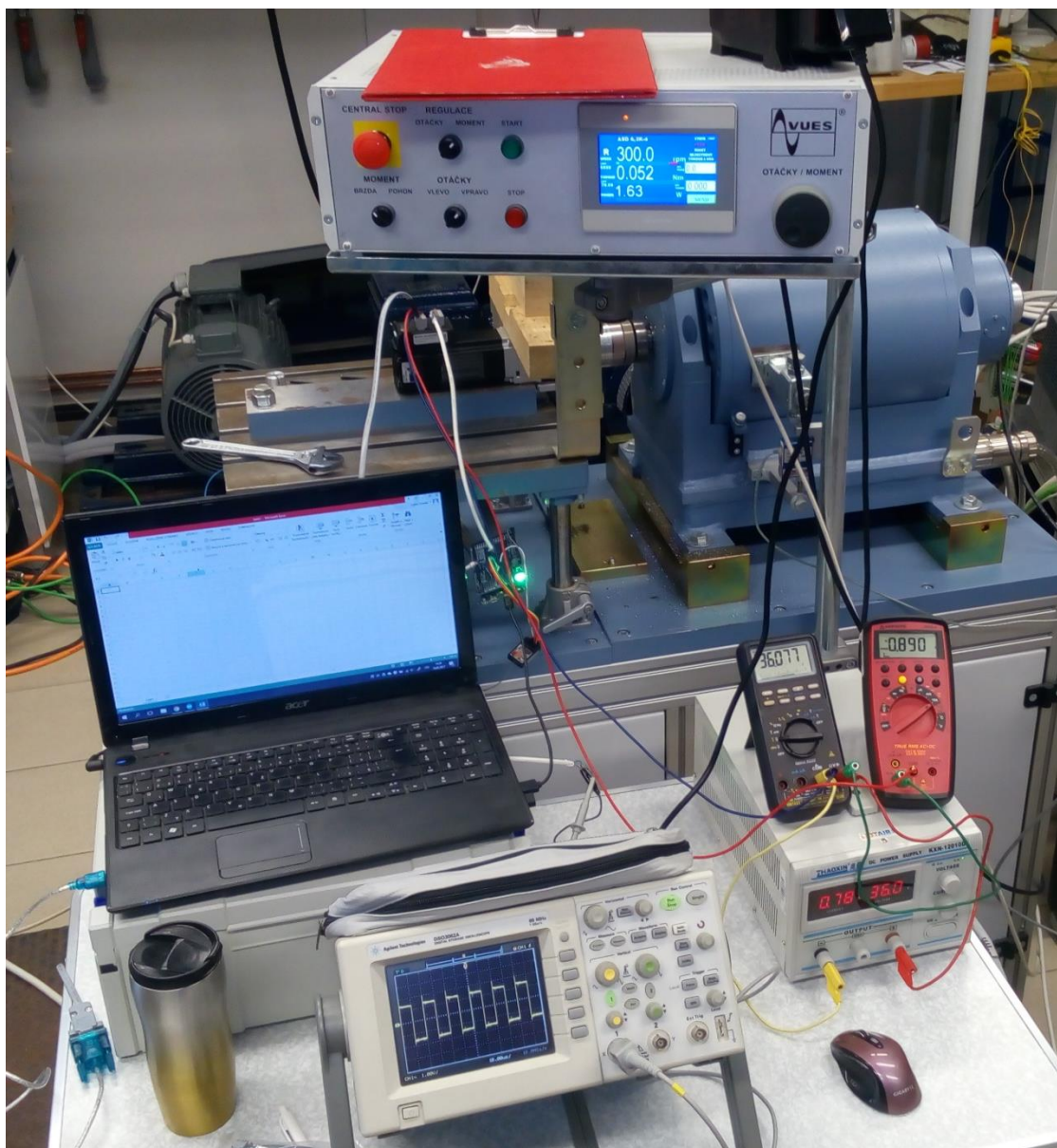
Obr. 36: Průběh polohy hřídele motoru pohonu v čase při zastavení

Během seznámení a následném rozboru programu od výrobce motorů byl zjištěn nepříjemný fakt, a to ten, že data naměřená programem není možné jakýmkoliv způsobem z programu exportovat. Kdyby data z programu byla exportovatelné, lze data naimportovat do programu Matlab a následně identifikovat přenos celého systému, který například následně použít toolboxu SISOTOOL v programu Matlab a jednoduše nastavit regulátor pro celý systém. Toto bohužel nebylo možné a jediný způsob nastavení hodnot regulátorů motorů pohonů byl využít prostředí dodané výrobcem, které umožňuje pouze zobrazení odezvy na jednotkový skok a kontinuální zobrazení polohy do času 2 vteřin.

Nastavení regulátoru tedy proběhlo ručně přes prostředí dodané výrobcem postupným zkoušením a měřením v prostředí tohoto programu.

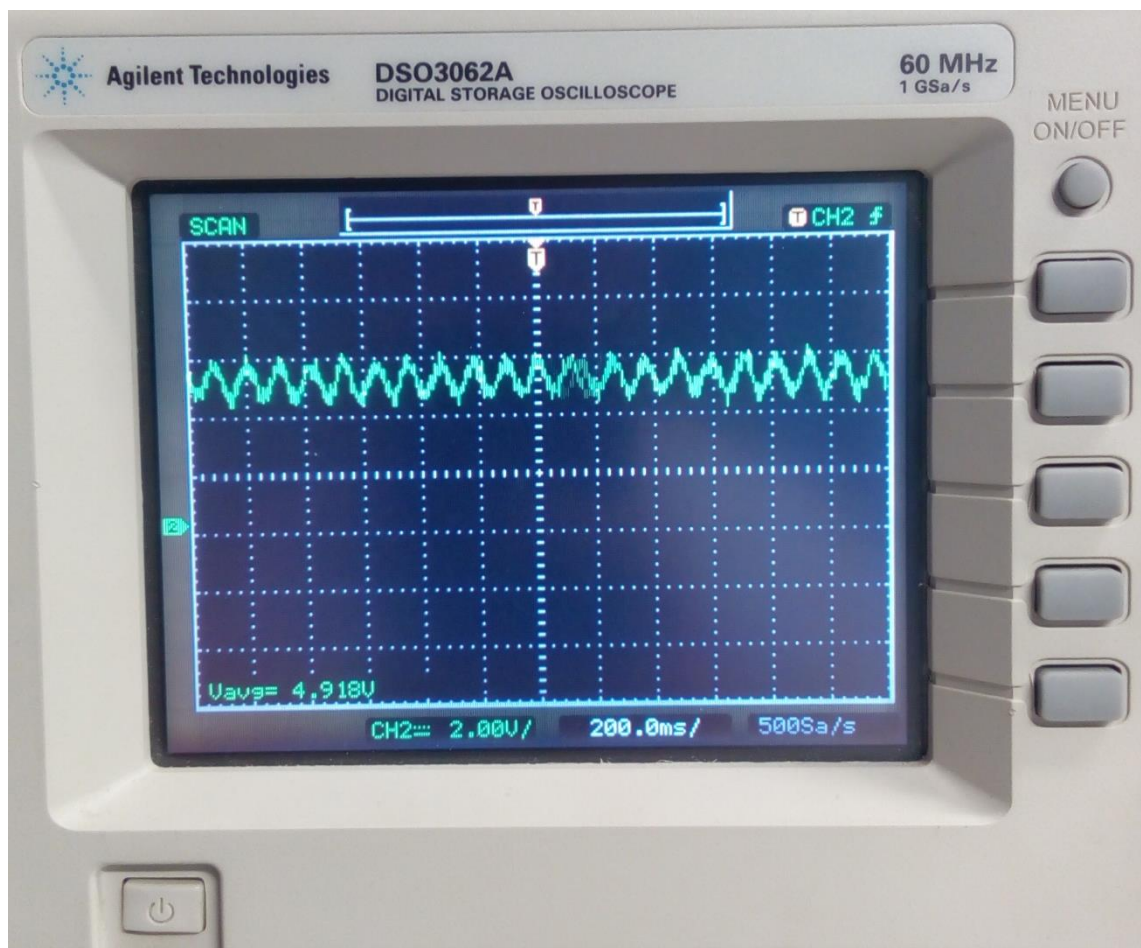
5.5 Měření účinnosti motoru a převodovky

Za účelem zjištění reálných hodnot účinností převodovky a samotného motoru bylo provedeno měření na dynamometru Dynofit ASD 6,3K-4. Při pokusu měření samotného motoru na tomto dynamometru byl zjištěn fakt, že dynamometr má značně velký moment setrvačnosti, který není schopen motor překonat, i díky tomu, že nelze vyřadit PID regulátor motoru. Měření samotného motoru bylo provedeno na experimentálním dynamometru, který navrhl doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D. a také pomohl s měřením těchto motorů. Měření motorů i s převodovkami bylo provedeno na dynamometru Dynofit, jelikož s převodovým poměrem 10:1 již motor měl dostatečný krouticí moment pro překonání setrvačných sil dynamometru.



Obr. 37: Měření motoru s převodovkou na dynamometru Dynofit

Při měření vlastností motorů vznikla ještě další komplikace. Vzhledem k vlastnostem motoru BLDC docházelo ke zvlnění proudu tekoucího do motoru. To je dáno postupným spínáním a vypínáním příslušných cívek motoru dle otočení hřídele motoru. Díky tomu nebylo možné měřit proud digitálním multimetrem a bylo zapotřebí použít proudovou sondu připojenou k osciloskopu. Při měření proudu tímto způsobem byla odečítána střední hodnota proudu vypočtená osciloskopem.

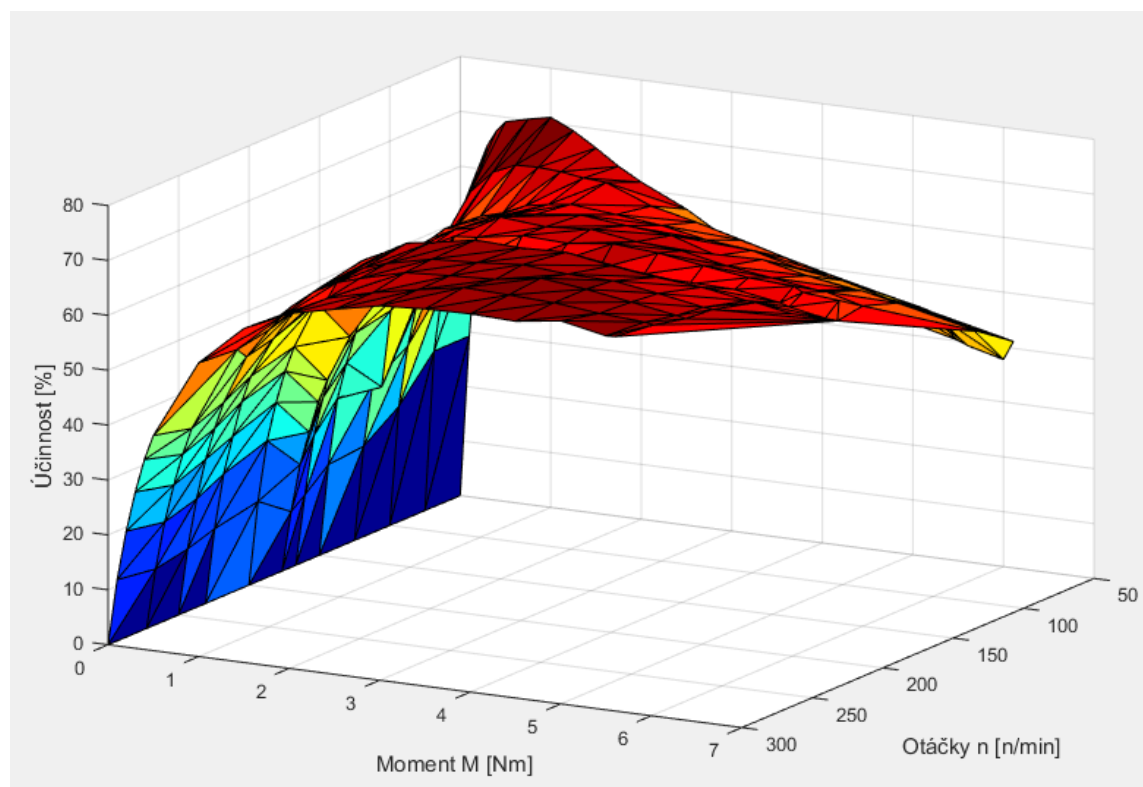


Obr. 38: Obrazovka osciloskopu při měření proudu motoru

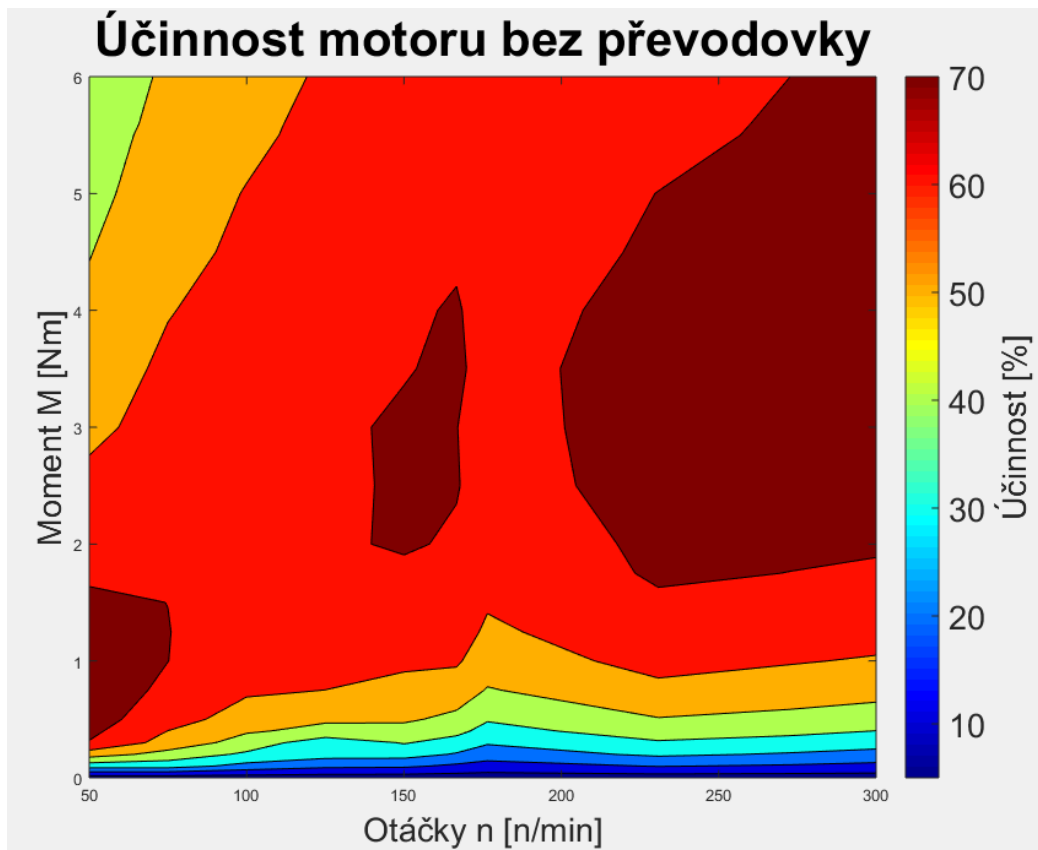
6 Výsledky

6.1 Výsledky měření pohonu na dynamometru

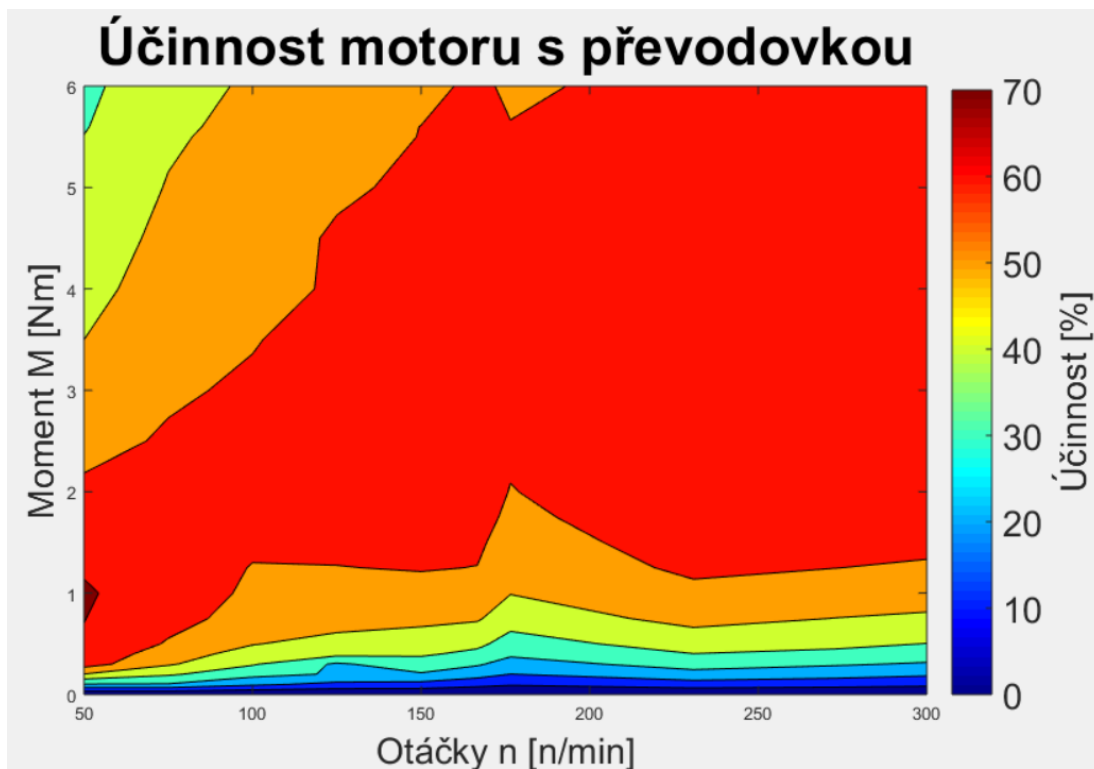
Na spočítaných hodnotách účinnosti z měřených hodnot je jasně viditelné, že účinnost samotného motoru se blíží 70 %. Účinnost motoru s převodovkou je přes 60 %. Lze tedy potvrdit hodnoty účinnosti převodovky výrobce, že účinnost převodovky je až 95 %. Při navrhované provozní rychlosti otáčení kol 166 otáček za minutu má motor dobré účinnosti v širokém spektru zatížení. Bohužel experimentální dynamometr pro měření samotného motoru není dimenzovaný výkon motoru 160 W. Při brždění motoru tímto dynamometrem musí být energie motoru odvedena ven z dynamometru, u toho dynamometru proud tekoucí z dynamometru je vyveden do výkonných rezistorů, kde je přeměněn na teplo. Bohužel tyto zátěžové rezistory nejsou dimenzovány na výkony, které motor při 2000 otáčkách za minutu a vyšších produkuje.



Obr. 39: 3D graf účinnosti motoru s převodovkou



Obr. 40: 2D graf účinnosti motoru



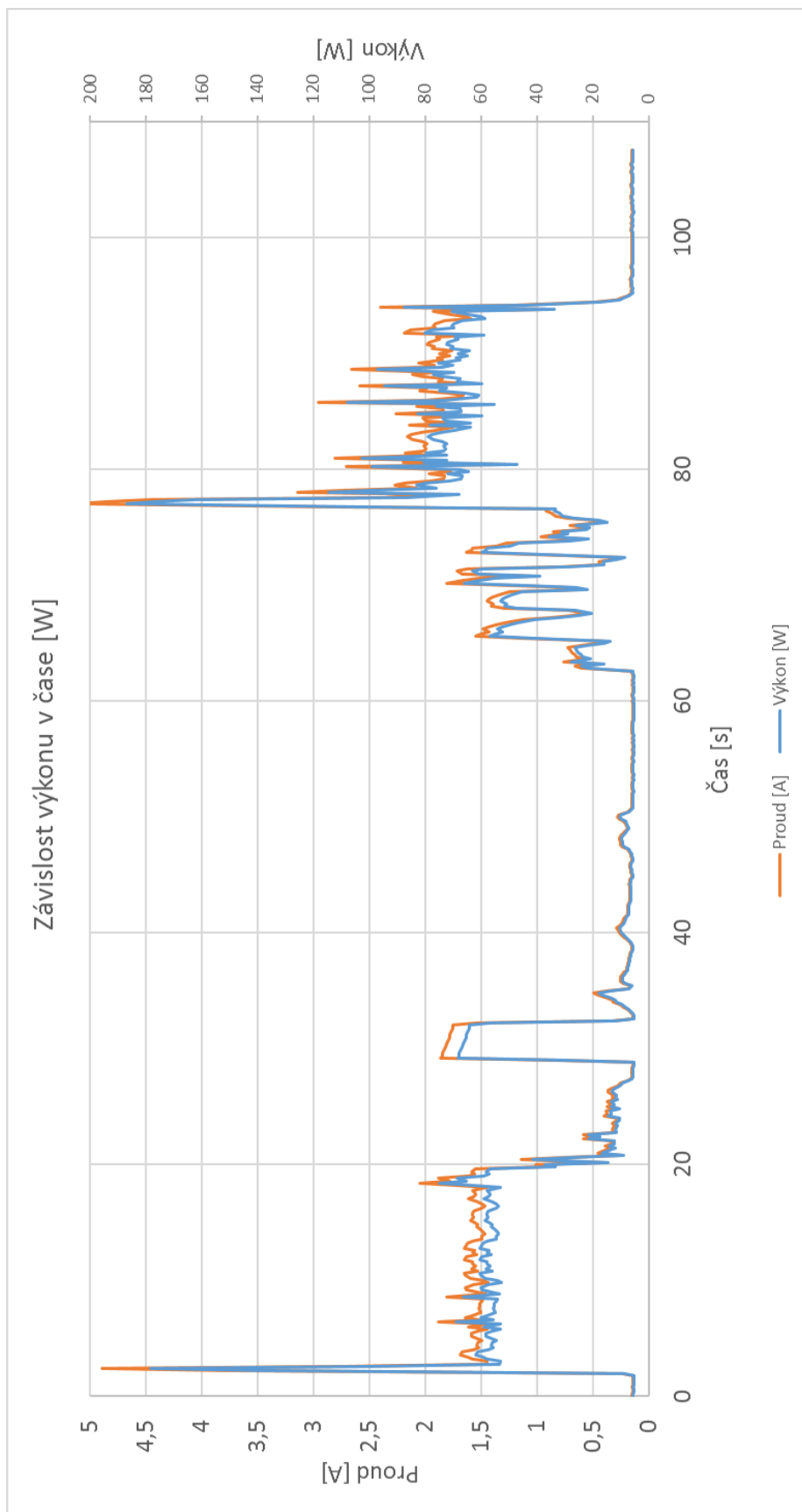
Obr. 41: 2D graf účinnosti motoru s převodovkou

6.2 Výsledek laboratorních testů platformy

Za účelem zjištění spotřeby elektrické energie z trakční baterie byla vytvořena testovací dráha o vzdálenosti 25 m. Dráha obsahovala označený startovací a cílový prostor. Cílový prostor byl umístěn mezi překážkami. Průběh byl následující: Mobilní platforma s prázdnou konví odstartovala ze startovací pozice a jela do cílové pozice mezi překážkami. Zde byla platforma zatížena závažím o hmotnosti 30 kg odpovídající váze transportovatelného materiálu. Následně platforma vyjela z pozice zpět do startovací pozice. Celková dráha činí tedy 50 m. Průběhy napětí a proudu byly zaznamenávány výkonovým datalogerem. Během testovací jízdy bylo též pořízeno laboratorní video.



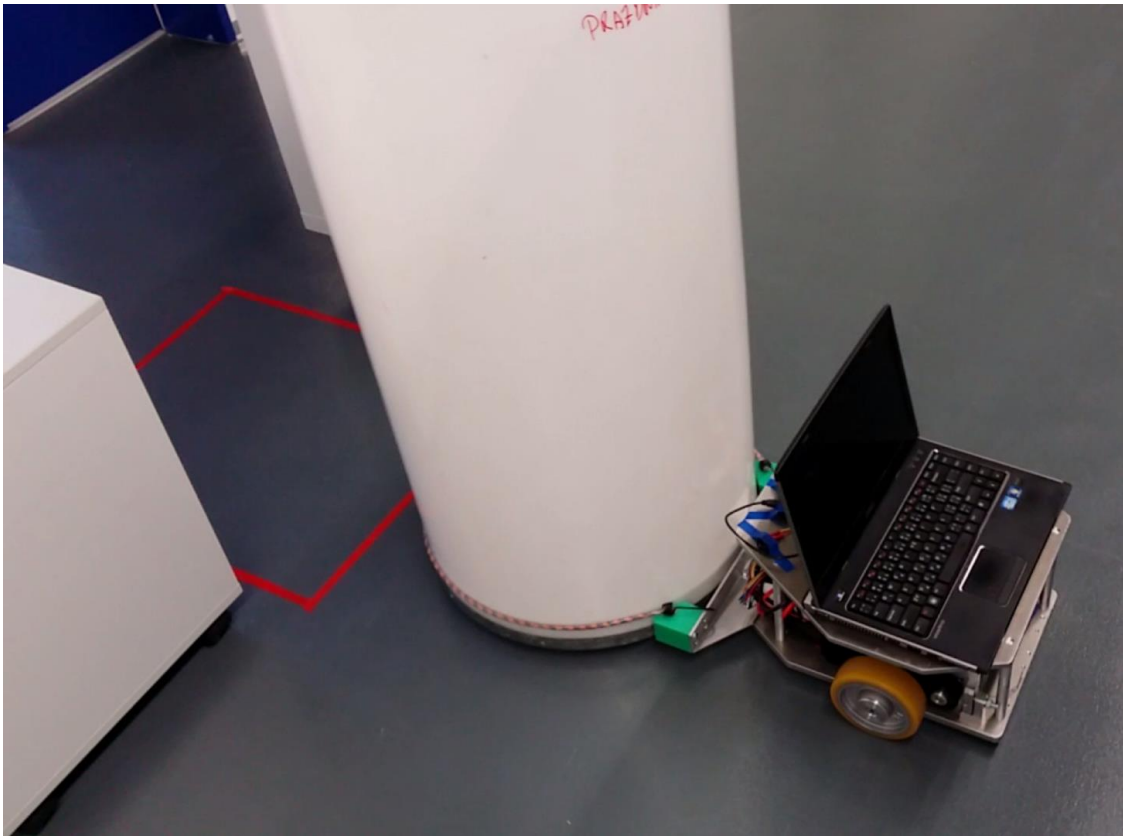
Obr. 42: Mobilní platforma s konví ve startovací pozici



Obr. 43: Záznam testovací jízdy

Na předchozí stránce je vyobrazen graf obsahující data z měření jízdy testovací dráhou. Vyobrazen je proud a výkon odebíraný z trakční baterie. Jak je viditelné, v čase 2 s mobilní platforma vyráží s prázdnou konví ze startovací pozice maximálním možným výkonem, po rozjetí na stálou rychlost střední hodnota odebíraného výkonu činí 58 W. V čase 20 s dojíždí do cílové pozice. V čase 30 s je spuštěn přidržovací mechanismus konve. V čase 62 s mobilní platforma provádí vyjetí z cílové pozice mezi překážkami a v čase 75 s vyráží maximálním výkonem zpět do startovací pozice.

Střední hodnota výkonu na testovací dráze je rovna $E = 33 \text{ W}$. Jmenovitá kapacita trakční baterie činí 184 W. Lze tedy jednoduchým výpočtem předpokládat nepřetržitý provoz mobilní platformy z trakční baterie více než 5,6 h.



Obr. 44: Mobilní platforma zajiždějící do cílové pozice mezi překážky

7 Závěr

Náplní této diplomové práce bylo navrhnout a vybrat vhodný pohon a trakční baterii celé mobilní robotické platformy. Vzhledem ke vlastnostem jednotlivých typů platform byla vybrána diferenciální platforma, která ke svému běhu využívá dva nezávisle hnané pohony. Po výpočtu jízdních odporů mobilní robotické platformy byly vybrány motory společně s převodovkami.

Během realizace mobilní robotické platformy se vyskytlo několik problémů. Za největší problém lze považovat regulátory motorů, které není možné jakýmkoliv způsobem vyřadit. Tím pádem není možné spolehlivě identifikovat přenosovou funkci systému mobilní robotické platformy. Jako nejlepší řešení bylo vybráno a odzkoušeno postupné nastavování hodnot jednotlivých složek PID regulátorů a sledování průběhů otáčení hřídelí motorů.

Po instalaci pohonů mohl být postupně tvořen řídicí systém těchto pohonů. I přes dlouho řešené potíže byl řídicí systém navržen do podoby vhodné i pro spolupráci s nadřazeným systémem autonomního řízení.

Při vývoji řízení mobilní robotické platformy byly vyřešeny i některé mechanické části platformy, konkrétně změna třetího, tzv. opěrného bodu platformy. Původní návrh byl navržen s kulovým ložiskem. To se ale během testování jevílo jako nevhodné až nefunkční. Kulové ložisko bylo nahrazeno systémem kolečka, který využívají nákupní vozíky.

Během laboratorního testování na dynamometru a testovací dráze byly zjištěny skvělé výsledky účinností pohonů, převodovek i spotřeby. Doba provozu mobilní robotické platformy byla ustanovena nejméně 5,6 hodiny.

Seznam použité literatury

- [1] VEX Robotics 3.25" Omni-Directional Wheel. In: *Robotshop* [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z:
<http://www.robotshop.com/ca/en/vex-robotics-325-omni-directional-wheel-4pk.html>
- [2] Robot omnidirectional drive. *Commons.wikimedia* [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Robot_omnidirectional_drive.PNG
- [3] Alternativa IR auta ze sady NXT. In: *Robowiki.spsnome* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z:
<http://robowiki.spsnome.cz/Programovani/Cviceni-02?action=imagelink&i=nxt-ir-auto.jpg>
- [4] Wheel Control Theory. In: *Robotplatform* [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z:
http://www.robotplatform.com/knowledge/Classification_of_Robots/wheel_control_theory.html
- [5] Pásový podvozek Tank-01. In: *Hobbyrobot* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z:
<http://www.hobbyrobot.cz/wp-content/uploads/tank01.jpg>
- [6] WC400-DB4. In: *Superdroidrobots* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z:
<http://www.superdroidrobots.com/images/TP-192-004.jpg>
- [7] Elektrický robot Spot. In: *Armadninoviny* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z:
<http://www.armadninoviny.cz/roboticky-mezek-v-namorni-pechote-dobehal.html?stranka=4>
- [8] *Princip stejnosměrných motorů* [online]. 2008 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z:
<http://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnsmernych-motoru>
- [9] *Stejnsměrné motory* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
<http://www.fce.vutbr.cz/rada.v/ELTECH/EL.DOC>
- [10] Motor s kroužkovým rotorem. In: *Elektrika* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z:
http://elektrika.cz/obr/08_motorskrouzkovymrotorem_01v.jpg
- [11] *BU-205: Types of Lithium-ion* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [12] Arduino Due. In: *Pololu* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z:
<https://a.pololufiles.com/picture/0J4196.1200.jpg?e1187b7fadb362686f550ab79d6cd08>

- [13] *ARDUINO – příručka programátora* [online]. PDF. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.hobbyrobot.cz/wp-content/uploads/ArduinoPriruckaProgramatora.pdf>
- [14] ISV-B23180. In: *Leadshine* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.leadshine.com/productdetail.aspx?type=products&category=servo-products&producttype=integrated-servo-motors&series=ISV-B&model=iSV-B23180>
- [15] Představení vysílačky Flysky FS-GT2B. In: *Rc.305* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://rc.305.cz/view.php?cisloclanku=2012060003>
- [16] Tiny BMS s516 - 150A/750A. In: *Energusps* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://www.energusps.com/shop/product/tiny-bms-s516-150a-750a-36>
- [17] Turnigy nano-tech 5000mah 6S 65~130C Lipo Pack. In: *Hobbyking* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-nano-tech-5000mah-6s-65-130c-lipo-pack.html