

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Řídicí a informační systém pro  
elektrické jednostopé vozidlo**

**Control and Information System for  
Electric Vehicle**

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Dedek**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma: **Řídicí a informační systém pro elektrické jednostopé vozidlo**  
**Control and Information System for Electric Vehicle**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací systému pro řízení elektrického vozidla a vizualizací provozních údajů.

V souhrnu je práce charakterizována následujícími body:

1. Rešerše řízení BLDC motorů za různých pracovních režimů.
2. Návrh a realizace řízení motoru jednostopého vozidla.
3. Návrh a implementace vizualizačního rozhraní.
4. Realizace provozních testů.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] EMADI, Ali. *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. 1st ed. Electrical and Computer Engineering, CRC Press, 2005. ISBN 978-0824723613.
- [2] WACH, Piotr. *Dynamics and Control of Electrical Drives*. Berlin: Springer-Verlag, 2014. ISBN 978-3642441837.
- [3] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - ATmega16*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-174-8/978-8073001742.
- [4] HORÁK, B., K. FRIEDRISCHKOVÁ, J. KAZÁRIK, J. NOWAKOVÁ a Z. SLANINA. *Elektromobilita II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3532-7. Dostupné z: [http://netfei.vsb.cz/downloads/autorske\\_texty/Elektromobilita%20II.pdf](http://netfei.vsb.cz/downloads/autorske_texty/Elektromobilita%20II.pdf).
- [5] ATMEL CORPORATION - firemní dokumentace. Dostupné z: <http://www.atmel.com>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Slanina, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



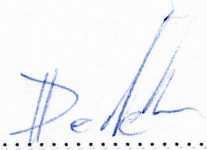
doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 29.dubna 2016

  
.....



Rád bych na tomto místě poděkoval několika lidem, bez kterých by tato práce nevznikla. Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Zdeňkovi Slaninovi, PhD za ochotu číst mé romány a dokonce je opravovat, za konzultace nad rámec úředních hodin a za vstřícnost, dnes tolik vzácnou. Rád bych poděkoval všem pedagogům na VŠB, kteří se podíleli na mém vzdělání, zejména těm, kteří praktickou výuku upřednostňují před impakty. Děkuji panu doc. Mgr. Jiřímu Dvorskému, Ph.D. za nástroj zvaný L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X a hodiny konzultací k němu. Mé velké díky patří panu Ing. Františku Bobrovi, bez něj by práce byla pouze na papíře. Mé poslední a největší díky patří mým blízkým. Bez nich bych byl demotivovaným bezdomovcem, nikoliv člověkem ucházejícím se o inženýrský titul.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá vývojem řídicího a informačního systému a výrobou prototypu elektrického jednostopého vozidla s důrazem na použití bezkartáčového motoru s permanentními magnety a baterií jako zdrojem elektrické energie. Vyvinutý řídicí systém umožňuje provádět konfiguraci parametrů vozidla operátorem, kterému rovněž budou zobrazovány provozní údaje, jako například okamžitou rychlost, ujetou vzdálenost nebo procesní teploty. Dále také budou zobrazována data ze správy bateriového systému (BMS), jako například dojezd na stávající kapacita baterie, okamžitý výkon a další. Zobrazovací jednotka byla vybrána na základě experimentálně zjištěných parametrů při provozu vozidla. Rozhodující byla zejména čitelnost při různých světelných podmínkách. Vozidlo je vybaveno standardní regulací rychlosti, možností reverzace i nadstandardními funkcemi, jakými jsou tempomat, světla a klakson. Hlavním přínosem práce je vytvoření elektrické dvoustupňové převodovky, která pracuje na nepříliš často využívaném principu přepínání motoru mezi konfiguracemi zapojení do hvězdy a do trojúhelníku.

**Klíčová slova:** Bezkartáčový motor, řízení, HMI, elektronická převodovka, transformace hvězda trojúhelník, BMS, balancery, atmega2560

## **Abstract**

This thesis deals with a development of control and information system and a production of prototype of electric wheeled vehicle with an emphasis on a use of brushless engine with permanent magnets and battery which us a power source. The developed control system allows to configure parameters of the vehicle by an operator, which also will have necessary information, such as speed, distance travelled, or process temperature diplayed. Data from a battery management system (BMS), such as the range of actual capacity of the battery, instantaneous power and more, can be displayed as well. A display unit has been chosen based on experimental parameters which had been obtained during operation of the vehicle, especially the legibility under various light conditions was crucial. The vehicle is equipped with a standard speed control, reverse options and premium functions such as cruise control, lights and horn. The main contribution of this thesis is the creation of an electric two-stage gear, which works on rarely used principle when an engine is switching between star configuration and triangle configuration.

**Key Words:** Brushless DC electric motor, control, HMI, electronic transmission, delta - star transfiguration, BMS, balancers, atmega2560.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2 BLDC motor a jeho režimy</b>	<b>13</b>
2.1 Vlastnosti BLDC motorů	13
2.2 Typy BLDC motorů	13
2.3 Řízení BLDC motorů	14
2.4 Pracovní režimy BLDC motorů	15
<b>3 Řízení jednostopého vozidla</b>	<b>17</b>
3.1 Komerční jednotka MagicPie	17
3.2 Vlastní řídicí jednotka	18
3.3 Ostatní periferie	19
3.4 Měření teploty	21
3.5 Spolupráce s BMS	25
<b>4 Návrh a implementace vizualizačního rozhraní</b>	<b>29</b>
4.1 Vlastnosti vizualizačního rozhraní pro elektrokoloběžku	29
4.2 Volba a výroba hardwarového vybavení HMI	29
4.3 Tvorba programového vybavení HMI	31
<b>5 Realizace provozních testů</b>	<b>36</b>
5.1 Volba komponent pro stavbu koloběžky	36
5.2 Architektura rozmístění komponent	38
5.3 Provozní testy nultého prototypu s Li-Lion bateriemi	40
5.4 Provozní testy prvního prototypu s Pb bateriemi	40
5.5 Elektronická převodovka	43
5.6 Měřicí experiment v terénu	48
5.7 Provozní testy druhého prototypu s LiFePO4 články	52
<b>6 Závěr</b>	<b>54</b>
<b>Literatura</b>	<b>56</b>
<b>Přílohy</b>	<b>56</b>





## Seznam použitých zkratek a symbolů

ADC	– Analog to Digital Converter (Převodník analogové veličiny na digitální)
BEMF	– Back Electro-Magnetic Force (Protielektromotorická síla, zkáceně též protiemsá)
BLDC	– Brushless DC (electric motor) (Bezkartáčový stejnosměrný motor)
BMS	– Battery Management System (Systém pro správu článků)
CRC	– Cyclic redundancy check (Cyklický redundantní součet)
DC	– Direct Current (Stejnoseměrný proud)
EEPROM	– Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (Druh paměti - Elektronicky mazatelná)
FLC	– Fuzzy Logic Controller (Fuzzy řídicí systém)
FPGA	– Field Programmable Gate Array (Hradlové pole)
GPS	– Global Positioning System (Globální polohovací systém)
HMI	– Human Machine Interface (Předávání informací člověk - stroj)
HW	– HardWare (Hardware)
I <sup>2</sup> C	– Inter-Integrated Circuit (Druh meziprocesorové komunikace)
LCD	– Liquid-Crystal Display (Displej na bázi tekutých krystalů)
LED	– Light Emitting Diode (Světlo emitující dioda)
MCU	– Microcontroller Unit (Mikroprocesorová jednotka)
OW	– 1-Wire (Jednodrátová sběrnice)
PC	– Personal Computer (Osobní počítač)
PCB	– Printed Circuit Board (Deska plošných spojů - též DPS)
PM	– Permanent Magnets nebo Permanentní Magnety
PWM	– Pulse Width Modulation (Pulzně Šířková Modulace v češtině PŠM)
RTC	– Real-Time Clock (Hodiny reálného času)
RTO	– Robotic Team Ostrava (Robotický Tým Ostrava - jednotka pod kterou autor práce působí)
SPI	– Serial Peripheral Interface (Druh meziprocesorové komunikace)
SW	– SoftWare (Software)
USART	– Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter (Druh meziprocesorové komunikace)
USB	– Universal Serial Bus (Druh meziprocesorové komunikace)

## Seznam obrázků

1	Způsoby řízení střídavých motorů . . . . .	15
2	Ideová funkce regulace původní jednotky Magic Pie . . . . .	17
3	Komerčně dostupná sada pro přestavbu kol Magic Pie . . . . .	18
4	Ideová funkce nové řídicí jednotky . . . . .	18
5	Rozšířené blokové schéma konfigurace nového řízení jednotky . . . . .	19
6	Průběh rychlosti vozidla pro analýzu přepínání rozložení fází motoru . . . . .	20
7	Časové diagramy sběrnice 1-Wire . . . . .	23
8	Funční měření teploty na několika senzorech . . . . .	24
9	Deska plošného spoje pro modul tlačítek . . . . .	30
10	Propojení modulu tlačítek k modulu displeje . . . . .	31
11	Menu zprovozněné v rámci přípravy . . . . .	32
12	Obrazovky vizualizace . . . . .	33
13	Implementace vizualizací do HMI . . . . .	34
14	Fotografie koloběžky Mezeq . . . . .	36
15	Přehled technologi sekundárních článků . . . . .	37
16	Možnosti rozmístění článků ve vozidle . . . . .	39
17	Fotografie nultého prototypu . . . . .	40
18	Nástroj pro záznam provozních dat Speedict Mercury . . . . .	41
19	Graf průběhu provozních veličin testování nultého prototypu . . . . .	42
20	Schéma zapojení elektronické převodovky . . . . .	44
21	Vnitřní rozložení motoru . . . . .	45
22	Hotový prototyp jedna po dokončení elektronické převodovky . . . . .	45
23	Graf průběhu provozních veličin testování prvního prototypu . . . . .	47
24	Výškový profil trasy Papežov - Lysá hora . . . . .	48
25	Trasa cesty z Lysé hory . . . . .	50
26	Trasa cesty z Lysé hory ve 3D . . . . .	50
27	Graf průběhu provozních veličin testování v terénu . . . . .	51
28	Výkresy druhého prototypu . . . . .	52
29	Fotografie druhého prototypu . . . . .	53
30	Ilustrační foto použití koloběžky . . . . .	55

## Seznam tabulek

1	Deklarace jednotek v protokolu komunikace s BMS . . . . .	26
2	Shrnutí výsledku měření jízdy z Lysé hory . . . . .	49

# 1 Úvod

Úlohou této práce je vytvoření elektrického jednostopého vozidla, zvládající městskou zástavbu i lehčí terén, s kompletním řídicím systémem, a funkčně zpracovaným předáváním informací mezi člověkem a strojem.

V posledních letech se vlivem klesající ceny akumulátorů, elektroniky i pohonných soustav rozmohl trend elektrifikace běžných městských dopravních prostředků a výroba nových typů vozidel na míru městskému provozu. Ať už se jedná o populární Segwaye, elektrická kola, vozíky pro nepohyblivé osoby, nebo v poslední době i koloběžky nebo jednokolky. Tato práce se zabývá výrobou podobného vozidla na míru potřebám běžného člověka.

Požadavky běžného uživatele jsou kromě nízké ceny následující: stroj by měl být lehce ovladatelný, bezpečný, co možná nejlehčí, tolerantní vůči lidským chybám včetně menších havárií, měl by mít co největší dojezd, co nejkratší dobu nabíjení, co nejlevnější provoz, tedy co nej Hospodárnější motor, a měl by splňovat zákonné požadavky pro provoz na pozemních komunikacích. Má-li být oblíbený, měl by mít i nadstandardní výbavu, která poskytuje komfort při dlouhých cestách, mezi nimiž je pohodlné sezení, tempomat, výkonná světla a pěkný vzhled. Bohužel v našich končinách je nutno myslet i na bezpečnost ve smyslu „security“, tedy na odolnost takového zařízení proti krádeži.

Podobně jako všechny inženýrské práce, je i tato o kompromisech výše zmíněných požadavků. Nelze vyhovět všem, a už vůbec ne, pokud se dají do protiváhy s požadavkem nejprosažovanějším a prve zmíněným, kterým je cena.

Tato práce si klade zejména za cíl vytvoření funkčního prototypu s odzkoušením dvoustupňové elektrické převodovky ve spojení práce s tvorbou kolegy, který vytváří BMS. Kombinací těchto dvou prací vznikne pojízdné a unikátní vozidlo se schopností shromažďovat a reprezentovat data uživateli pomocí vizualizačního systému na palubě vozidla.

První kapitola této práce se zabývá pohonem jednostopého vozidla, tedy BLDC motorem. V podkapitolách jsou nastíněny typy, režimy, možnosti řízení a obecně povrchní informace o tomto typu pohonu. V druhé kapitole se na tomto motoru postaví řídicí systém, včetně výše zmíněného přepínání hvězda - trojúhelník. V kapitole třetí je vysvětlena volba konkrétního vizualizačního systému a jeho programového vybavení. V kapitole čtvrté jsou popsány testy na prototypu. Poslední kapitola pátá - závěr je shrnutím celé práce s důrazem na praktické poznatky, výsledky a přínos studenta.



## 2 BLDC motor a jeho režimy

V této kapitole budou vysvětleny důvody volby BLDC motoru, jeho vlastností, typů řízení a různých režimů pohonu.

### 2.1 Vlastnosti BLDC motorů

Bezkartáčové stejnosměrné motory, anglicky „Brushless DC electric motor“, jsou evolučním nástupcem běžných stejnosměrných komutátorových motorů, které mění svět již třetí století v řadě.

Obyčejně stejnosměrné motory mají komutátor, mechanickou součástku zajišťující přepínání fází a tedy i samotný provoz motoru. Bohužel tato mechanická součástka je namáhána třením, platí za nejslabší článek stejnosměrného motoru. Kromě těchto provozně ekonomických vad jsou zde i další neméně důležité, a to jiskření vznikající přepínáním, které způsobuje elektromagnetické rušení šířené vzduchem a při nesprávném odstíněním i napájecí sítí.

Všechny tyto neduhy jsou odstraněny v bezkartáčové verzi stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Tento model, ačkoliv je znám již dlouho, nebyl využit a to z několika důvodů. Permanentní magnety dostatečné síly a kvalitních mechanických vlastností jsou ekonomicky náročné. Řízení přepínání fází nebo aplikace složitějších algoritmů vyžaduje složitou elektroniku a poměrně vysoký výpočetní výkon. Vždyť pro řízení některých výkonných BLDC motorů jsou využívány FPGA.

Tyto motory v posledních desetiletích zaujímají přední místo v nízkovýkonových aplikacích do několika kW, a to hlavně díky trvanlivosti, jednoduchému polohování, vysoké efektivitě a lepším mechanickým vlastnostem (moment a rozsah otáček). Užívají se například v mechanikách pevných disků, ve větráčcích zajišťující chlazení a nebo v motorovém modelování letadel. V poslední době se prosazují vlivem vývoje nových, čistších a „silnějších“ magnetických slitin, poklesu jejich ceny a rovněž poklesu ceny řídicích prvků, i do elektrických vozidel, ať už je řeč o elektrokolech s výkonem v řádech stovek wattů, nebo elektromobilech s výkonem v řádech stovek kilowattů.

### 2.2 Typy BLDC motorů

Dělení BLDC motorů je několikeré. Lze je dělit podle použitých permanentních magnetů, podle počtu fází, pólů (pólových dvojic) a v neposlední řadě podle situačního rozložení rotoru a statoru či charakteristiky průběhů napětí na cívkách.

Rozdělení podle použitých PM má zásadní vliv při výběru motoru na jeho celkovou efektivitu. V počátcích vývoje BLDC motorů se jako magnety používaly dostupné a levné ferity, ty však nemají ideální tvar magnetizační křivky. V posledních letech se rozmohly magnety na bázi vzácných prvků, konkrétně Neodymu (Nd) a Samarinu (Sm). Neodymové magnety jsou

nejsilnější na světě, unesou až 1300 násobek své hmotnosti. Takto silné magnety dokáží výrazně zvýšit účinnost celého motoru.

Stejnoseměrné bezkomutátorové motory se dále mohou dělit podle fází na jednofázové, dvoufázové a třífázové. Podle počtu pólů či pólových dvojic se často motory v literatuře nedělí, nicméně počet magnetických pólů v rotoru ovlivňuje velikost kroku a zvlnění točivého momentu motoru. Vyšším počtem pólů se zmenšuje krok a zmenšuje zvlnění.

Podle situačního rozložení se BLDC motory dělí na vnitřní a vnější. Přesněji řečeno na motory s vnitřním rotorem a vnějším rotorem. Jak už dělení samo napovídá, jde konstrukční uspořádání, z něhož se odvíjí funkce motoru. Motory s vnějším rotorem mají stator upevněn a rotor s PM kolem statoru vykonává točivý pohyb. Tyto motory lze vidět například v chladicích soustavách PC, notebooků nebo v motorech, kde rotorem je zároveň kolo. Opačné uspořádání, tedy situace, kdy je rotor obalen statorem a jeho rotační pohyb je ven z těla motoru vyveden hřídelí, se vyskytuje u uzavřených mechanismů, jako například obráběcích strojů, nebo elektromobilů.

Poslední výše uvedené rozdělení je podle BEMF, které respektuje vnitřní uspořádání magnetů motoru, a to buď obdélníkové (lépe řečeno lichoběžníkové) nebo sinusové. Tyto tvary respektují také fázové proudy.

## 2.3 Řízení BLDC motorů

Na téma řízení BLDC motorů jsou zpracovávány samostatné diplomové ba dokonce i disertační práce, literatura je plná typů řízení, které se více či méně opírají o dva základní druhy řízení bezkartáčového motoru. Ty budou velmi povrchně naznačeny v následujících podkapitolách.

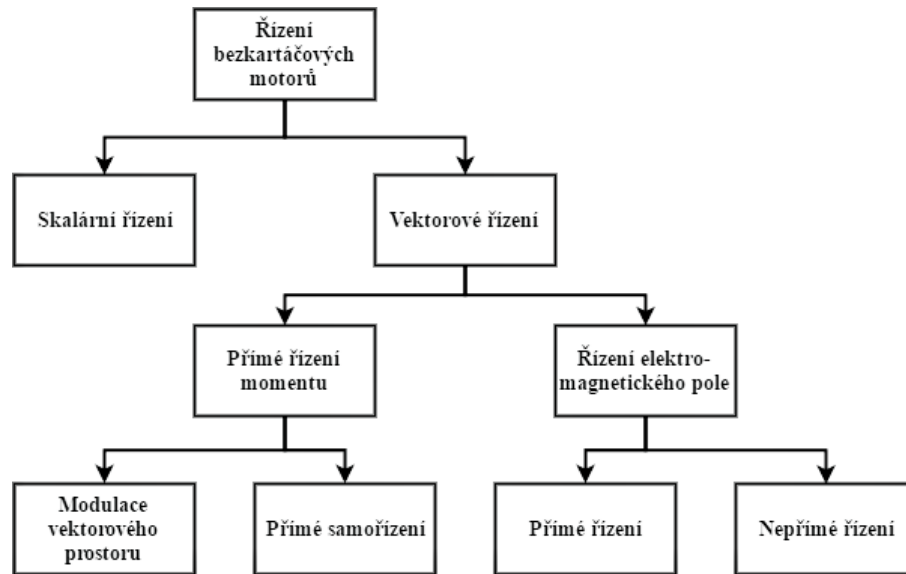
### 2.3.1 Skalární řízení

Tato metoda řízení byla a je použita u drtivé většiny střídavých motorů, a to díky svým dostatečným vlastnostem, nízké náročnosti a možné absenci senzorů. Skalární řízení je nejjednodušším možným řešením. U stejnosměrných bezkartáčových motorů se jedná o sepnutí, respektive naměrování dvou napětí fází (většinou jedno řídicí a jedna zem, tedy 0V) tak, aby přitáhla rotor (tím vzniká točivý pohyb). Třetí fáze je nečinná, nebo se využívá k odečtení okamžiku přepínání, viz níže v kapitole bezsenzorové řízení. V další části cyklu se úloha fází změní, lépe řečeno úlohy se posunou ve směru otáčení rotoru. Ačkoliv se toto řízení zdá jednoduché a neefektivní, dá se říci, že pro drtivou většinu aplikací bez důrazu na dynamiku dostačuje.

Mezi výhody patří bezpochyby jednoduchost takového řízení a možnost absence senzorů. Nevýhodou jsou horší dynamické vlastnosti pohonu (dynamika momentu).

### 2.3.2 Vektorové řízení

Vektorové řízení bylo objeveno a zkoumáno v sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století, ale jeho rozvoj a uplatňování začaly až s vývojem rychlých polovodičových měničů a řídicích jednotek s dostatečným výkonem. To se podařilo až koncem devadesátých let.



Obrázek 1: Způsoby řízení střídavých motorů

V zásadě se toto řízení zaměřuje na moment, a to jak ve statickém režimu (například ve jmenovitých otáčkách), ale hlavně v režimu dynamickém, tedy v přechodových dějích. Tím, že se zlepší moment, a maximální otáčky si ponechají vlastnosti ze skalárního řízení, se celkově zvýší efektivita a tím i účinnost stroje. Nezanedbatelná je rovněž delší životnost namáhaného stroje.

Moment je zlepšen redukcí vektoru proudu působícího rovnoběžně s vektorem magnetického toku. Tento vektor způsobuje magnetizaci celého motoru a jalový výkon. [2].

Momentové řízení je složitější než řízení skalární. Z vektorového řízení se vyvozují všechny další složitější řídicí algoritmy například přímé řízení momentu a přímé řízení pole (viz obrázek 1).

## 2.4 Pracovní režimy BLDC motorů

Režimy BLDC motorů lze díky nestejnorodé terminologii a rozcházejícím se překlady vysvětlovat různě. V následujících podkapitolách bude pojednáno o většině z nich, zejména o těch, které jsou důležité pro tuto práci.

### 2.4.1 BLDC motor zapojený do hvězdy, nebo trojúhelníku

Tyto dva režimy jsou v profesionální sféře často opomíjeny, a to z jednoho důvodu, že se motory nevyrobějí v prepínatelné konfiguraci. Téměř vždy lze motor koupit v jedné ze dvou konfigurací bez možnosti ji změnit. Tato dodávaná konfigurace se odvíjí od účelu využití motoru. Pro modelářské účely se BLDC pohony dodávají téměř zásadně v zapojení do trojúhelníku, a to proto, že toto zapojení má vyšší maximální otáčky na úkor momentu (který při napojení na správně nadi-menzovanou vrtuli není zapotřebí tak vysoký). Naopak pro většinu ostatních aplikací, například

pro precizní řízení, elektrokola nebo elektromobilu, je nutný točivý moment, a je tedy výhodnější zapojení do hvězdy. Dlužno poznamenat, že kromě maximálních otáček a momentu jde v těchto dvou módech hovořit i o dalších jevech. Například o snížené efektivitě motoru v zapojení do trojúhelníku vlivem vysokofrekvenčních proudů v uzavřené smyčce (uzavření do trojúhelníku).

Tyto a další více či méně důležité poznatky však nemají vliv na samotný fakt potřebný pro tuto práci, a to, že konfigurace do trojúhelníku má vlivem větších napětí vyšší otáčky a tedy rychlost, kdežto konfigurace do hvězdy má vyšší proudy, tím pádem je schopna vyvinout větší točivý moment.

#### 2.4.2 Senzorový a bezsenzorový režim řízení BLDC motoru

Jak již bylo zmíněno v kapitole zabývající se řízením BLDC motoru, pro správnou funkci motoru je třeba znát polohu rotoru. To lze provést buďto pomocí senzorů (nejčastěji senzory na principu halova jevu, případně enkodéry) nebo bezsenzorově. Tento bezsenzorový mód funguje na bázi snímání napětí na právě volné fázi třífázového motoru.

Jestliže skalární řízení zjednodušíme na stav, kdy jedna fáze je sepnuta proti druhé fázi, která je přizemněna. Bezsenzorový mód potom snímá napětí na aktuálně nečinné fázi a v okamžiku, kdy se napětí naindukuje (vlivem přechodu jednoho z pólů rotoru), posune celou situaci o jednu fázi po směru otáčení motoru. Tedy například fáze, na niž bylo přivedeno napětí, bude snímána. Fáze, která přizemňovala, bude přivádět napětí. A konečně fáze, která nám minulý cyklus snímala, bude přizemňovat.

Vzhledem k požadavkům trhu a současné koncepci výroby, kdy se tlačí na nejnižší možnou výrobní cenu, je tento mód a styl řízení zkoumán a uplatňován do řídicích jednotek právě kvůli úsporám financí na senzorických systémech, které jsou doposud velmi nákladné na výrobu a kalibraci právě kvůli potřebě přesného měření. [7] Tento režim řízení má jednu zásadní chybu, nedokáže (v základním režimu, tak jak byl popsán výše) roztočit motor nebo operovat v nízkých rychlostech. Proto se používá pouze v situacích, kde toto nevádí. Příkladem je motor modelu letadla (obsluha na zemi ho roztočí ručně a ve vzduchu se vrtule vždy otáčí), nebo elektrokolo, kde se v levnějších modelech nepoužívá rozjezd, ale pouze dopomoc, tedy tzv. „příšlap“.

BEMF, tedy zpětná elektromotorická síla (z eng. Back Electromotive Force), je napětí naindukované na nečinné fázi přesně  $30^\circ$  před správným komutačním okamžikem. V Českých zemích byla známa v padesátých letech jako protielektromotorická síla neboli zkráceně protiemsá. [6]

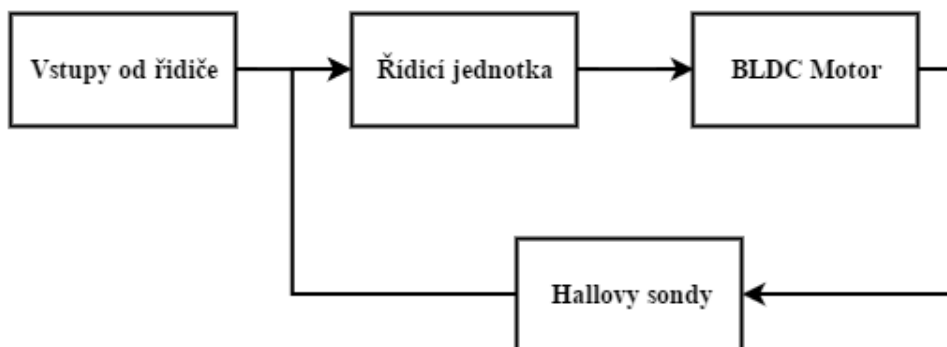


### 3 Řízení jednostopého vozidla

Ve většině případů obstarává řízení jednostopého vozidla centralizovaný systém řízení na bázi monolitického mikropočítače. Tento systém obsluhuje veškeré senzory včetně podnětů od obsluhy, obstarává regulaci motoru, kontroluje elektrické veličiny primární baterie, rychlost, provozní teploty, v případě nadstandartní výbavy poskytuje možnost zapnout tempomat nebo světla. V případě elektrokol se řídicí systém stará o míru dopomoci jezdcí, tedy o poměr energie vkládané řidičem a motorem.

#### 3.1 Komerční jednotka MagicPie

V první části realizace této práce byl zakoupen motor Magic pie 3 a k němu řídicí jednotka. Ta zvládala řízení motoru včetně reverzace, rekuperace, výkonového tempomatu, dále pak snímání podnětů od uživatele, a předávání informací o poruše pomocí piezoelektrické sirény. O poloze rotoru jednotku informovala trojice halových senzorů. Jednotka využívá skalární řízení BLDC motorů, je schopna fungovat i v bezsenzorovém módu, avšak s omezenými vlastnostmi, jako je maximální rychlost nebo maximální točivý moment. V základní výbavě byl rovněž uvažován i senzor pedálů, pro tuto práci však nemá opodstatnění. Blokový diagram řídicí jednotky Magic pie je na obrázku 2



Obrázek 2: Ideová funkce regulace původní jednotky Magic Pie

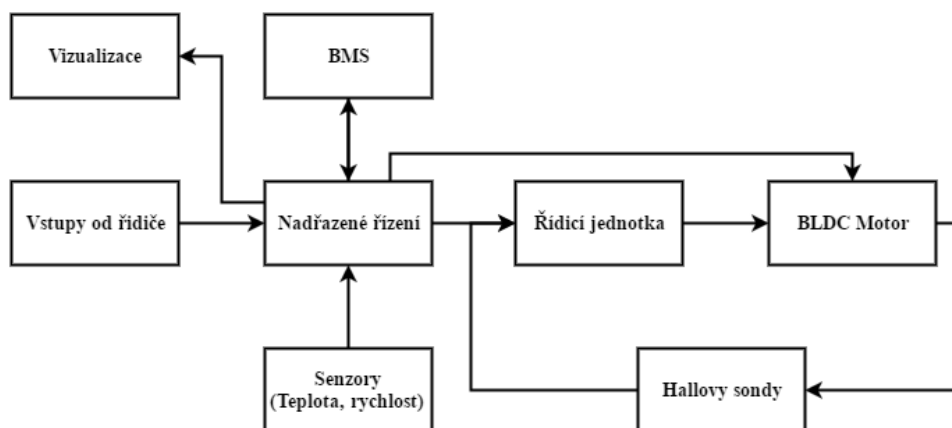
Pro programování nebo přesněji parametrizaci řídicí jednotky byl zakoupen programovací kabel, což je převodník dat z USB na piny řídicí jednotky. V jednotce lze parametrizovat například úroveň akcelerace, reverzace, rekuperace, maximální hodnoty proudů a pochopitelně také nominální napětí akupacku. Na obrázku 3 je celá sada pro přestavbu.



Obrázek 3: Komerčně dostupná sada pro přestavbu kol Magic Pie. Převzato z [8]

### 3.2 Vlastní řídicí jednotka

Jelikož některé důležité funkce řídicí jednotka Magic pie postrádá, bylo rozhodnuto vytvořit nadstavbu rozšiřující její funkce. Pro plnohodnotné a bezpečné využití baterie je potřeba komunikovat s BMS. Pro zajištění bezpečnosti a dlouhé životnosti komponent je nutno monitorovat teploty. Dále je možno implementovat GPS modul pro trasování, Bluetooth modul pro komunikaci se smart zařízeními a akcelerometr pro detekci pádu nebo jiných krizových situací. V původní jednotce chybí i elementární funkcionalita měření rychlosti. V neposlední řadě lze zahrnout obsluhu světel, klaksonu, doplnění funkce rychlostního tempomatu či zpracování dat pro vizualizaci. Zjednodušené blokové schéma soustavy je na obrázku 4.

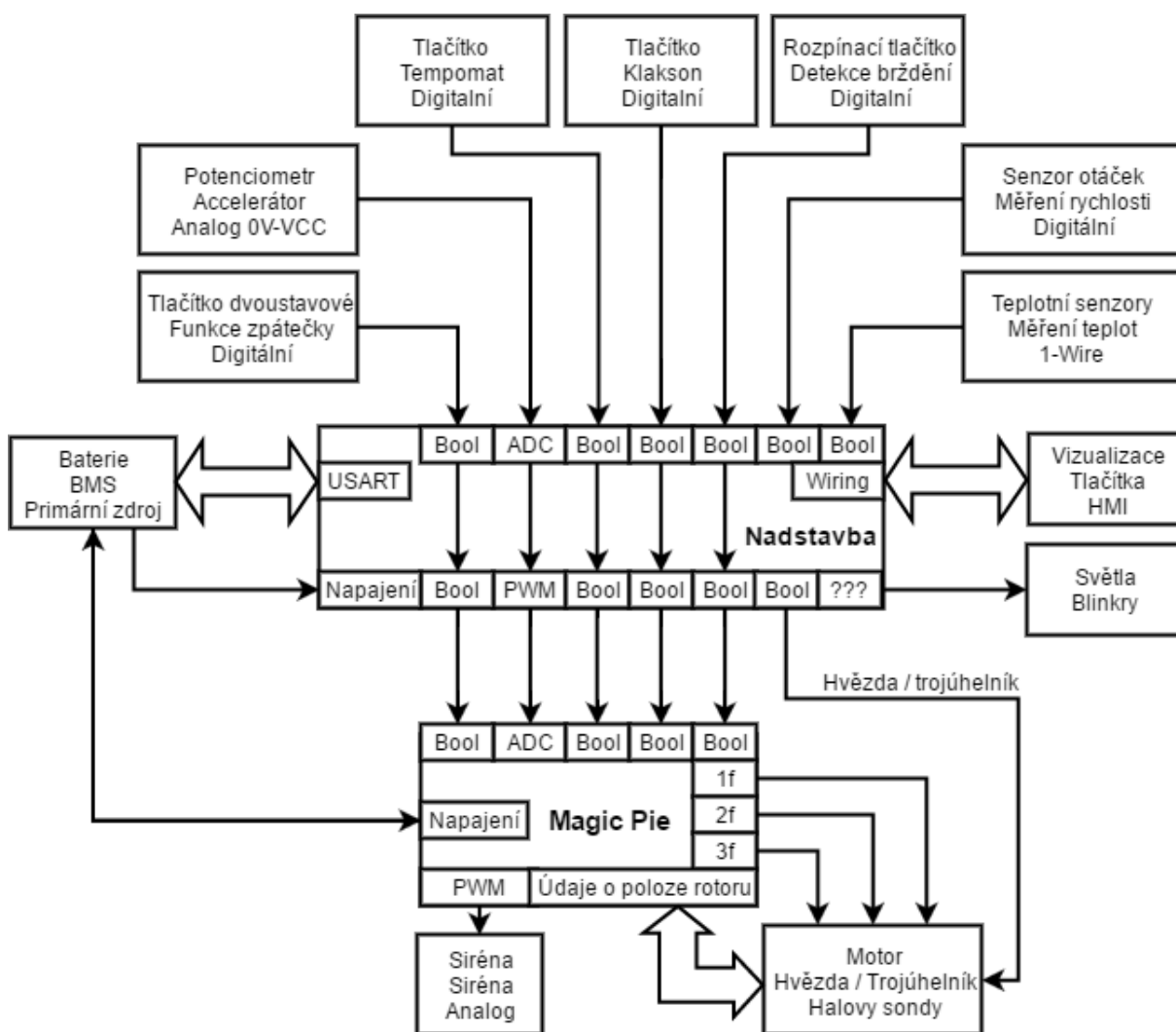


Obrázek 4: Ideová funkce nové řídicí jednotky

### 3.3 Ostatní periferie

Pro rozšíření funkčnosti je potřeba přemostit vstupy od uživatele přes vyšší řízení, zpracovat je a poslat řídicí jednotce upravené nebo v původním stavu. Tento proces přivádí důležitá data ke zpracování do nadřazeného řízení. V situaci, kdy acupack je na konci své kapacity a jakýkoliv velký odebíraný proud sníží napětí pod dovolenou mez, odpojí BMS akupack od zátěže. V nové koncepci je možno hlídat tento stav díky datům z BMS a přemostěním signálů, uměle vytvořit profil pro akceleraci, který nezpůsobí takový pokles napětí. Za cenu snížení akcelerace na konci kapacity baterie tak získáme mírně zvýšený dojezd.

Na obrázku 5 je rozšířené blokové schéma kompletního řízení elektrokoloběžky. Původní vstupy jsou: akcelerátor, zpátečka, klakson, tempomat a snímače na brzdové páčky.

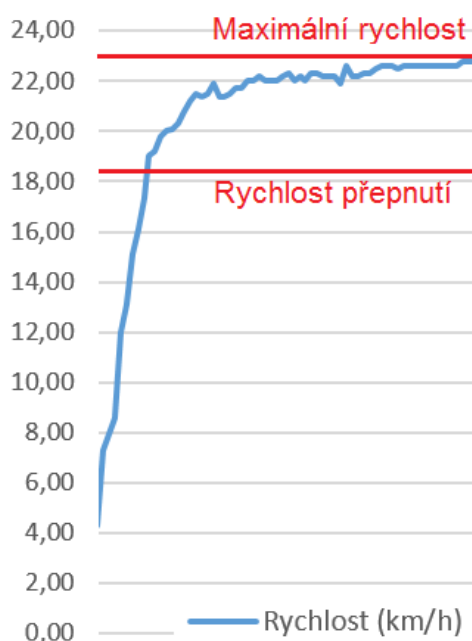


Obrázek 5: Rozšířené blokové schéma konfigurace nového řízení jednotky

Přidané snímání úhlové rychlosti a její přepočítání na rychlost vozidla, ujetou vzdálenost a další parametry, jsou základním údajem pro vyhodnocování dat o spotřebě, dojezdu, ceně za

kilometr atd. Magnetický senzor na jednom místě kola vyhodnocuje otočku, tedy chvíli, kdy magnet protne osu magnetického senzoru, tedy urazí úhel  $2\pi$  (rad). Úkolem systému je měřit dobu, za kterou tuto otočku provede, a přepočítávat z úhlové rychlosti a známého průměru kola obvodovou rychlost a tedy i rychlost stroje. Celková dráha se počítá jako počet pulzů ze senzorů otáček vynásobeným obvodem kola, z této dráhy je následně vypočten celkový počet ujetých km, dojezd, trip aj.

Jedním z hlavních přínosů práce je implementace dvoustupňové elektronické převodovky, tedy transfigurace hvězda – trojúhelník. Tato přestavba je podrobněji popsána v kapitole 5. Pro testování je přepínání vyvedeno na spínač a volba módu jízdy je na rozhodnutí řidiče. V budoucích algoritmech se nabízí několik možností, podle jakých principů realizovat přepínání a tedy řazení. Nejjednodušší možností je nastavit ostrou hranici rychlosti, kdy se přepne rozložení fází. Reálně by tato hodnota měla být odvozena z křivky akcelerace, obrázek 6, přibližně v 80% maximální rychlosti modu hvězdy, pochopitelně s uměle zanesenou hysterezí.



Obrázek 6: Průběh rychlosti vozidla pro analýzu přepínání rozložení fází motoru

Další možností je expertní systém, nebo FLC (Fuzzy Logic Controller). Tyto alternativy předpokládají vnesení zkušenosti experta do programu ať už v ostrých číslech nebo fuzzy množinách. Pro ideální převodovku by měla být zohledněna aktuální hodnota proudu, napětí a pochopitelně rychlosti. Prozatím jsou tyto úvahy ve fázi teoretických úvah a je možné, že řídicí systém na bázi AVR nebude schopen úspěšně a s dostatečnou výkonovou rezervou implementovat FLC, a to ani v případě použití nejjednodušších algoritmů Takagi – Sugeno.

V pokročilé fázi prototypového testování se předpokládá varianta vestavěnými světly a blinkry pro bezpečnější jízdu a rovněž pro bezpečí za snížené viditelnosti. Prozatím jsou světla pouze koncepcí a plánum do budoucna. Vzhledem k důvodu použití a složitosti sběrnice 1-Wire

bude tato samostatně probrána v následující kapitole 3.4. Stejně jako význam a komunikace s BMS, kapitola 3.5, a celý HMI v kapitole 4.

### 3.4 Měření teploty

Pro správnou funkci na hraně výkonových maxim celé soustavy je nutno měřit teplotu na několika místech, a to na řídicí jednotce (zejména výkonovém stupni), jednotlivých akumulátorech i jednotce správy BMS, vestavěném zdroji pro nabíjení, a pakliže je motor přetěžován, tak i na motoru samotném. K těmto všem teplotám je vhodné vzít v úvahu referenční měření teploty okolí, a to ideálně jak na slunci tak ve stínu.

Měření teploty lze realizovat mnoha způsoby. Při výběru rozhoduje perioda měření, požadovaná přesnost, počet senzorů, nestandardní prostředí a výkonové i konektorové omezení nadřazeného měřicího systému. V případě elektrokoloběžky není potřeba získávat data příliš přesná, jedná se o celé stupně, které znamenají problém, nikoliv o desetiny či setiny stupně Celsia. Na periodu měření nejsou rovněž kladeny zvláštní nároky. Veškeré teplotní děje (přehřátí článku BMS, nebo motoru) probíhají s natolik malou dynamikou, že i při měření s periodou sekund není problém je zachytit a provést opatření včas. Vzhledem k elektromagnetickému rušení vycházejícího z motoru a spínací elektroniky lze předpokládat nutnost odolnosti proti tomuto typu rušení. U některých senzorů je rovněž potřebná vodotěsnost. Počet senzorů je zásadním problémem. Pokud necháme správu acupacku na řídicí jednotce baterie, tj. měření teploty na každém z 16 článků, teploty zdroje a teploty výkonové elektroniky, zbyde těchto několik teplot. A to teplota v prostoru baterie, teplota motoru, teplota výkonové elektroniky motoru, a několik referenčních teplot okolí. Lze tedy uvažovat o 5 až 10 senzorech stejného typu. Z těchto předpokladů lze vyvodit, že snímání analogových hodnot a jejich zpracování v nadřazeném systému (je-li uvažován centralizovaný systém) je velmi náročné pro výkon MCU a zejména pro obsazenost pinů a analogově digitálních převodníků.

Je potřeba, aby senzor měřil a zpracovával hodnotu teploty sám a nadřazenému systému posílal pouze digitalizovanou hodnotu. Téměř pro každý komunikační protokol (I<sup>2</sup>C, USART, SPI) existuje zařízení, které měří teplotu a zasílá nadřazenému systému digitální data právě pomocí daného protokolu. Tyto komunikační protokoly jsou však z hlediska datové propustnosti předimenzované a v mnohých případech na delších signálových trasách nedosahují požadovaných kvalit.

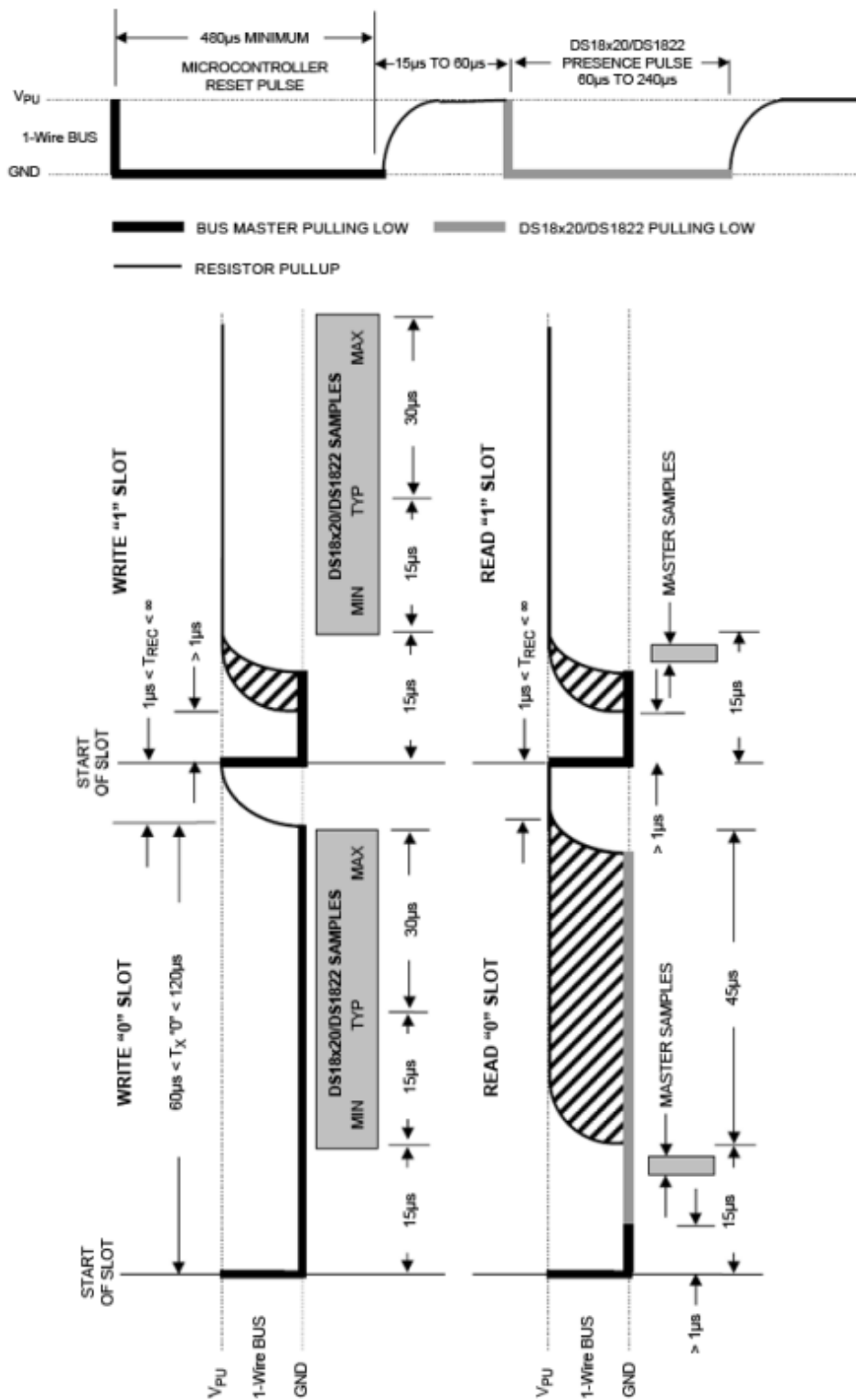
#### 3.4.1 Měření teplot na sběrnici 1-Wire

Firma Dallas Semiconductor vyvinula komunikační protokol 1-Wire. Je do značné míry podobný s I<sup>2</sup>C, datová linka pracuje v režimu otevřeného kolektoru. Jde o sériovou komunikaci, na sběrnici může být jedno master zařízení a několik stovek slave zařízení. Rozdíl je v počtu vodičů a v přenosových parametrech sítě. Datová propustnost 1-Wire není vysoká, maximálně 16kbps, díky maximální délce rovné přibližně kilometr se řadí k nejoblíbenějším komunikacím měření

teploty například v rodinných domech. 1-Wire používá pro svůj provoz dva až tři vodiče. Referenční zem, datový a napájecí vodič. Ovšem nepotřebujeme dosahovat velkých délek signálového vedení lze použít pouze zemní a datový vodič. V tomto případě se zařízení na sběrnici 1-Wire nabíjejí v dobách nečinnosti do interního kondenzátoru, který je používán jako zdroj energie pro vysílání nebo příjem. To vše je umožněno jednak nízkou spotřebou 1-Wire zařízení a rovněž tím, že v klidovém stavu je datová linka v logické jedničce, to znamená, že na datovém vodiči se objeví 5V nebo 3.3V a zařízení se mohou nabíjet. Tato zařízení jsou oproti svým konkurenčním jiných komunikačním sběrnici přesnější a levnější. Pro potřebu elektrokoloběžky bylo tedy rozhodnuto použít sběrnici 1-Wire v třívodičovém provedení a měřicí senzory firmy Dalas.

Vzhledem k optimalizaci výkonu a potřebě proniknout do systému komunikace bylo rozhodnuto vytvořit vlastní knihovnu pro protokol 1-Wire, a tu následně použít jak pro BMS tak pro řídicí systém.

V první řadě bylo potřeba vytvořit elementární funkce, a to reset, kterým komunikace vždy začíná, zápis bitu na sběrnici a čtení bitu se sběrnice. Následně pak vyčtení bajtu, zápis bajtu, CRC. Po odladění těchto základních funkcí na jednom slave zařízení bylo třeba naprogramovat hledání zařízení při inicializaci systému a zápis jejich adres do paměti pro oslovování slavů v hlavním běhu programu. Celé měření včetně přípravy dat pro zobrazování (viz kapitola vizualizace) se vykonává v přerušení čítače. Periodu přerušení lze měnit, ale v základním nastavení systém zvládal obsloužit 5 senzorů Dalas čtyřikrát v jedné sekundě a zároveň je zobrazit na LCD displeji – což byla ta pomalejší část. Jak již bylo zmíněno výše, dynamika tepelných jevů ohrožující komponenty elektrokoloběžky se určitě neudává ve zlomcích sekundy, ale v jednotkách či desítkách sekund.



Obrázek 7: Časové diagramy sběrnice 1-Wire. Převzato z [9]

Na obrázku 7 je časový diagram restartu, zápisu a čtení bitu na 1-Wire sběrnici. Z těchto

časových průběhů byly vyextrahovány konstanty použité pro čekání mezi kroky sekvence. Viz následující kód.

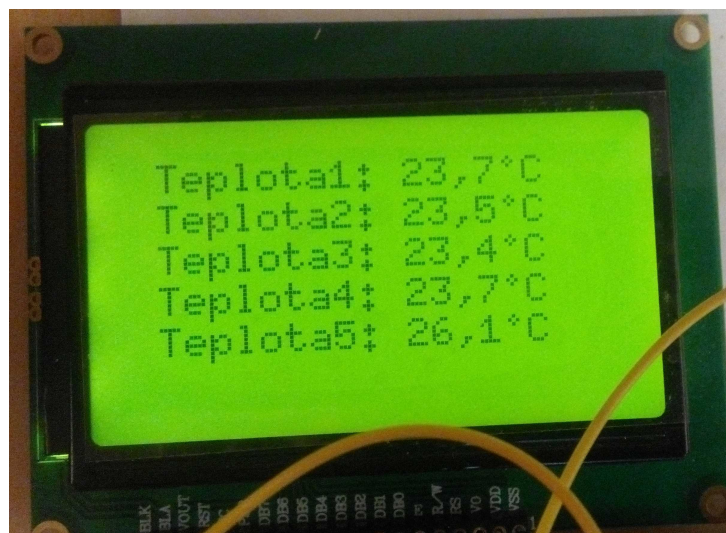
---

```
int owReset(void) {
    int result;
    _delay_us(G); //G = 0
    DDRB |= (1 << DDB0);
    _delay_us(H); //H = 480us
    DDRB &= ~(1 << DDB0);
    _delay_us(I); //I=70us
    result = PINB & (1 << PBO);
    _delay_us(J); //J=410us
    return result;
}
```

---

#### Výpis 1: Reset sběrnice one wire

Na obrázku 8 je vidět finální měření teploty v místnosti. Byla použita sběrnice s pěti zařízeními ds18b20, zavěšená vertikálně od stropu dolů. Poslední ze sensorů Dallas byl zahříván uměle (Teplota5). Sensory nejsou seřazeny podle vzdálenosti na sběrnici. Jejich přiřazování k místům které měří (motor, okolní teploty atd.) bude probíhat pomocí HMI v nastavení (viz kapitola 4). Fyzické adresy společně s identifikátorem budou uloženy do EEPROM, aby identifikace nemusela po vypnutí koloběžky probíhat znovu.



Obrázek 8: Funční měření teploty na několika senzorech



### 3.5 Spolupráce s BMS

BMS (battery management system) lze volně přeložit jako systém správy baterií. Tyto systémy se v posledních letech staly předmětem vývoje a výzkumu pro rozšiřující se elektromobilitu na bázi bateriových systémů. Od BMS jako jedné z klíčových komponent baterie se odvíjí cena, životnost, efektivita zdroje energie pro elektromobilitu, a tedy nepřímo i zásadní část ceny vozidla. Moderní BMS se dělí na dvě části, a to balanční systémy, což jsou malé samonosné desky plošných spojů, a řídicí desku. Řídicí deska zodpovídá za nabíjení, vybíjení, balancovací fázi nabíjení i rekuperace, nastavování parametrů a obecně komunikaci s balančními moduly, rovněž také komunikaci s nadřazeným systémem. Balanční systémy se nachází u každého jednotlivého primárního článku, jež dohromady vytváří celou baterii.

Návrh, provedení a realizace celé baterie k elektrokoloběžce jsou vyvíjeny v rámci diplomové práce mého kolegy. Tyto práce jsou cíleně provázané a navazují na sebe, protože je záměrem využít výstupů obou prací a spojit je do funkčního vozidla. Z těchto důvodů nebude v rámci teorie této práce řešen právě BMS, jeho rešerše a možnosti použití, ale budou zde pouze uvedeny výstupy z práce [12] mého kolegy.

Ústřední funkcionalitou BMS je hlídání napětí na článcích. Jestliže je o primárním článku známo, že při překročení napětí, například pro  $\text{LiFePO}_4$ , nad 3.8V nebo pod 2.5V, dojde k trvalému poškození, úkolem BMS je těmto stavům předejít. Spodní hranici napětí primárního článku lze překročit při normální jízdě až na konec kapacity. BMS hlídá napětí, a pokud by toto dosáhlo například hodnoty 2.6V, pošle BMS zprávou řídicímu členu pokyn ke snížení odebíraného proudu. Pokud napětí klesne na mez 2.55V na článek, BMS odpojí zátěž. Druhá problématická situace nastává při nabíjení. Jde o okamžik, kdy je hlídáno maximální napětí na článcích. Při nabíjení by mělo napětí na všech článcích růst stejně. Díky drobným technologickým odlišnostem v kapacitě či vnitřním odporům článků tomu tak není. Pokud nabíjíme proudem 5A, roste napětí do okamžiku, kdy první primární článek pošle řídicí jednotce BMS zprávu o dosažení balancovacího napětí (například 3.78V). Jednotka následně omezí nabíjecí proud na 0.5A. Tím jednak poklesne napětí, ale zároveň bude možno balancovat články. Balancování je situace, kdy se udržuje na článku konstantní napětí malým nabíjecím proudem a zbytek proudu se nevyužívá. Nevyužitá energie je odvedena tak, aby napětí na balancovaném článku nadále nezvyšovala.

Kromě minimálního a maximálního napětí je potřeba hlídat i další parametry baterie či primárních článků. Každý primární článek má maximální dlouhodobý proud a maximální špičkový proud. Vzhledem k tomu, že BMS pro naše účely bude zapojena v konfiguraci 8s nebo 16s, stačí proud měřit v jednom místě, tedy řídicí jednotce. Tedy celkový proud z baterie se rovná proudu z každého primárního článku. BMS musí umět limitovat, nebo odpojit vysoké proudy. Pokud se jedná o rekuperaci, vzniká zde problém s nabíjecím proudem. Ten je podle katalogového listu výrobce znatelně menší než maximální proud dodávaný do systému. Proto je opět nutno dodávaný proud upravit za pomoci BMS. V neposlední řadě je nutno sledovat teplotu každého primárního článku. Při vysokém výkonu ať už dodávaném nebo přijímaném musí být sledována teplota, aby

v okamžiku dosažení povolené hranice (většinou 60 °C) došlo k okamžitému odpojení zátěže. Jakékoliv vysoké výkony v jakémkoliv směru mohou vážně poškodit přehřáté primární články a tím značně zkrátit životnost baterie.

Z předchozích odstavců vyplývá, že k tomuto účelu budou sledovány parametry jako napětí a teplota každého článku spolu s proudem procházejícím soustavou. Vypočteny budou doplňující informace jako aktuální výkon, maximální energie, energie k dispozici v baterii. Rovněž bude možné upravit některé parametry z nadřazeného systému. Nejdůležitější je zaslání všech parametrů pomocí sběrnice UART řídicí jednotce koloběžky.

### 3.5.1 Protokol komunikace

V předchozí kapitole byly rozebrány potřeby informací o stavech uvnitř baterie. V této kapitole je objasněn koncept komunikace a komunikačního protokolu mezi BMS a řídicí jednotkou pro elektrokoloběžku.

Bylo rozhodnuto všechna data posílat ve wordu, který má velikost  $2^{16}$ . Následující tabulka 1 objasňuje jednotky a rozsahy zasílaných informací.

Veličina	Použitá jednotka	Rozsah	V základní jednotce
Teplota	d °C	<-32768;32767>	<-3276.8;3276.7> °C
Proud	cA	<-32768;32767>	<-327.68;327.67> A
Výkon	W	<-32768;32767>	< -32768;32767 > W
Napětí	mV	<0;65535>	<0;65,535> V
Celková Energie	dWh	<0;65535>	<0;6553,5> Wh
Zbývající Energie	dWh	<0;65535>	<0;6553,5> Wh

Tabulka 1: Deklarace jednotek v protokolu komunikace s BMS

Byly zvoleny velmi netradiční použité jednotky pro přenos. Teplotu jakékoliv části koloběžky ani okolí není nutno znát, ani měřit přesněji než na desetiny stupně, proto jsou použity d °C (decistupně). U horních dvou cifer rozsahu teplot nepředpokládáme výskyt nenulových hodnot. Naopak je předpokládán výskyt záporných hodnot teplot, proto je nutno volit znaménkovou proměnnou.

Jako zdroj proudu byly vybrány dva typy použitých článků. Jedny s maximálním proudem 45A a druhé 200A. Motor použitý pro tuto práci má maximální špičkový odběr 50A, motory kolegů mají maximum na hodnotě 80A. Všechny tyto rozsahy lze uvažovat v intervalu <-327;327>, byly zvoleny cA (centu ampéry) jako základní jednotky pro přenos informace o proudu. Proudů jsou kvůli používané rekuperaci znaménkové a lze měřit hodnoty od stovek ampér až do desítek miliampér, což je pro diagnostické účely nezbytné.

Výkon může v extrémním případě u motorů kolegů dosahovat přes 4800W špičkově, a to jak jako spotřebič i zdroj. Proto je nutno nechat výkony v základních jednotkách tedy Wattech.

Napětí článku se pohybuje od 2.5V do 3.8V, tedy není nutno měřit jej ve znaménkových hodnotách. Pokud počítáme s baterií 16 sériových článků, může maximální napětí stoupnout až na 60.8V. Maximální napětí výkonového stupně řídicí jednotky (tzv. absolut maximum rainting) je 63V. Rozsah 0 – 65.535V tedy pokryje všechna nedestruktivní napětí, která se mohou na koloběžce objevit. Proto byla zvolena jako základní jednotka 1mV.

Dodaná a celková energie baterie je neznaménkový údaj sloužící pro výpočty dojezdu a spotřeby. Nejsilnější uvažovanou konfigurací baterie je 16 článků zapojených sériově. Jeden článek má 20Ah, 3.2V nominálního napětí, tedy 64Wh. Maximální energie akumulátoru při šestnácti kusech je 1024Wh. Proto byla zvolena 1dWh jako základní jednotka. Rozsah je tedy 0 – 6553Wh nebo lépe 0 - 6.5kWh Existuje zde tedy prostor pro výměnu baterie za výkonnější.

### 3.5.2 Formáty zpráv

Formát zpráv komunikace mezi řídicí jednotkou BMS a řídicí jednotkou elektrického jednostranného vozidla je následující:

\* <typ zprávy><data 1>;...;<data n>;<CRC>;

1. \* – start byte
2. typ zprávy – jeden ASCII znak mimo \*
3. data – hexadecimální číslo kódované pomocí ASCII
4. ; – oddělení jednotlivých datových polí
5. CRC – hexadecimální číslo kódované pomocí ASCII

Startovací znak „hvězdička“ byl zvolen kvůli množství náběžných i sestupných hran, podle kterých si může přijímací zařízení nastavit hodiny pro komunikaci. Jako typ zprávy jsou zatím používána pouze písmena. Velká pokud komunikuje slave, malá pro master. Dále následují jednotlivé bajty dat, oddělené středníkem a zakončené CRC. Tento typ komunikace byl odzkoušen na několika projektech, a proto bylo rozhodnuto implementovat jej do komunikace koloběžky s baterií.

### Generální zpráva:

Zasílána s periodou 1s, bez dotazování a bez potvrzování.

**Slave:** \* G⟨Napětí(mV)⟩;⟨Proud(cA)⟩;⟨Teplota(d °C)⟩;⟨Výkon(W)⟩;⟨Max energie(Wh)⟩; ⟨Dostupná energie(Wh)⟩; ⟨CRC⟩;

### Napětí článků:

Zasílána na požádání. Master posílá požadavek malým písmenem, slave odpovídá stejným velkým písmenem. Při nabíjení se tyto zprávy odesílají automaticky s periodou 1s.

**Master:** \* v⟨CRC⟩;

**Slave:** \* V⟨Počet článků⟩;⟨Napětí 1(mV)⟩;...;⟨Napětí n(mV)⟩;⟨CRC⟩;

### Teploty článků:

Zasílána na požádání. Master posílá požadavek malým písmenem, slave odpovídá stejným velkým písmenem. Při nabíjení se tyto zprávy odesílají automaticky s periodou 1s.

**Master:** \* t⟨CRC⟩;

**Slave:** \* T⟨Počet článků⟩;⟨Teplota 1(d °C)⟩;...;⟨Teplota n(d °C)⟩;⟨CRC⟩;

### Vyčtení limitů BMS:

Na požádání

**Master:** \* r⟨CRC⟩;

**Slave:** \* R⟨Max proud(cA)⟩;⟨Max napětí(mV)⟩;⟨Min napětí(mV)⟩;⟨CRC⟩;

### Nastavení limitů BMS:

Master zasílá sadu parametrů, slave po zápisu potvrzuje vyčtením parametrů a odesláním zpět masterovi.

**Master:** \* w⟨Max proud(cA)⟩;⟨Max napětí(mV)⟩;⟨Min napětí(mV)⟩;⟨CRC⟩;

**Slave:** \* W⟨Max proud(cA)⟩;⟨Max napětí(mV)⟩;⟨Min napětí(mV)⟩;⟨CRC⟩;

### Chybové zprávy:

Při detekované chybě, například: Vysoké napětí (rekuperace) a následné odpojení od zdroje, překročení limitu proudu, vybitá baterie, příliš vysoká teplota atd.

**Slave:** \* e⟨Kód chyby⟩;⟨CRC⟩;

Kód chyby je běžné číslo (neznaménkový integer). Pro správné ošetření a rozpoznání chyby se musí v řídicím mechanismu koloběžky nacházet aktuální tabulka s významem těchto čísel. Kritické chyby budou ošetřeny přímo BMS. Jsou však zprávy, které nemají pouze informační charakter, například při situaci kdy je nutno snížit proud, aby napětí na článcích nekleslo pod stanovenou mez. Pokud by řídicí jednotka koloběžky nezareagovala a nesnížila proud do zátěže (například úpravou akcelerace), BMS by odpojil zátěž úplně.

## 4 Návrh a implementace vizualizačního rozhraní

Vizualizace v případě této práce, spíše HMI (tedy Human Machine Interface - přeloženo jako předávání informací mezi člověkem a strojem) je nedílnou součástí každého systému. Jakýkoliv systém, který neprezentuje svou činnost, je neúčinný. Pro reprezentaci stavu systému lze využívat LED, displeje, aktuátory, zvukový výstup, nebo jakýkoliv další způsob předání informací operátorovi. Rozdíl mezi vizualizací a HMI je následující: vizualizaci lze pochopit jako světelnou tabuli s odjezdy vlaků na železniční stanici. HMI má v sobě zahrnutu nejen vizualizaci, ale rovněž ovládání. Tabule odjezdů z minulého příkladu má rozhraní pro zadávání a úpravu zobrazovaných údajů, a právě toto rozhraní v kombinaci s tabulí je HMI.

### 4.1 Vlastnosti vizualizačního rozhraní pro elektrokoloběžku

Tato práce se zaměřuje na miniaturistické provedení palubního počítače. Miniaturistické z důvodu adekvátnosti rozměru vytvořeného HMI k rozměru celé práce. Palubní počítač, někdy nazývaný „cyklocomputer“, musí být realizován jako HMI – tedy musí mít část zobrazovací a část ovládací. Zobrazovací část by měla být čitelná za všech možných podmínek, tedy jak v noci tak na přímém slunci. Ovládací prvky musí být viditelné, jednoduše použitelné i za jízdy, dostatečně odolné proti vlivům počasí a navigace pomocí těchto prvků ve vizualizaci musí být intuitivní.

Z důvodu hustoty předávané informace, jasů, kontrastu a také ceny, byl vybrán LCD. Zobrazovací jednotky na bázi tekutých krystalů jsou levné, trvanlivé, s podsvíceným pozadím dobře čitelné jak v noci tak při přímém slunečním svitu. LCD jsou energeticky nenáročné a při použití paralelní komunikace jejich odezva dostává. Právě odezva může být v některých situacích zásadním nedostatkem této technologie zobrazovačů v některých aplikacích.

### 4.2 Volba a výroba hardwarového vybavení HMI

V této kapitole bude specifikován zobrazovač, řídicí jednotka a vstupy pro ovládání HMI.

#### 4.2.1 Zobrazovač

Jde o čínský produkt za řádově stovky korun, jehož parametry a kvality odpovídají ceně. Pro první pokusy s vizualizací a nejspíše i jako finální řešení bude pravděpodobně dostačovat.

Označení produktu LCD12864 označuje jednak technologii LCD tak rozměry. Rozlišením 128px širokým a 64px vysokým se při fyzických rozměrech 70×48mm velikostně řadí nad běžně dostupné palubní počítače pro elektrokola. Hustota předávané informace 5.21ppi (points per inch) je taky hodnota v tomto oboru vysoká. Nutno přiznat, že v této práci bude zobrazeno na displeji daleko více údajů, než zobrazují komerční elektrokola, takže větší počet informací na displeji je nutností. Displej obsahuje i LED pro podsvícení, možnost elektronické manipulace s kontrastem a další funkce. Řadičem konvertujícím informaci z nadřazeného systému na pixely

LCD je ST7920. Tento převodník v sobě pro základní použití obsahuje i znakovou sadu, takže ulehčí programátorovi základní operace. Pro pokročilejší funkce je potřeba využít grafický režim a adresovat pixely jednotlivě.

Jak již bylo naznačeno výše celý displej lze ovládat několika způsoby a to sériovou komunikací, 4bitovou paralelní komunikací, nebo 8bitovou paralelní komunikací. Tyto způsoby zohledňují použití. Vzhledem k množství informací, které se budou zobrazovány na displeji elektroloběžky, a jejich frekvenci obnovování je nutno zvolit nejpropustnější možnost, což je pochopitelně 8bitová paralelní komunikace.

#### 4.2.2 Řídicí jednotka

Pro řízení systému elektronického jednostopého vozidla byl vybrán čip Atmega2560 firmy Atmel. Jako jeden z mála klasických AVR mikrokontrolerů má k dispozici 4 USART sběrnice. Ty budou využity pro komunikaci s BMS, s motorovou jednotkou, případně pro GPS a Bluetooth. Rovněž disponuje mnoha čítači a časovači, včetně RTC pro používání hodin reálného času. Samozřejmostí je SPI, I<sup>2</sup>C, pro tyto periferie je v budoucnu plánováno připojení k SD kartě či akcelerometru pro další nadstavbové funkce. Další periferie lze dohledat v [5].

Pro testování byla zvolena vývojová deska Funduino (klon Arduina) obsahující právě čip Atmega2560. Vývojové sety Arduina jsou velmi populární především díky upravenému kódovacímu jazyku. V této práci byl použit pouze hardware a programování probíhalo v programovacím prostředí Eclipse v jazyce C. Pro finální podobu celé elektroloběžky je jako řídicí deska uvažována vlastní PCB s optimalizovaným rozmístěním cest vzhledem k jejich účelu, minimalizaci a pochopitelně vyvedení pouze využívaných pinů z pouzdra čipu.

#### 4.2.3 Vstupní periferie

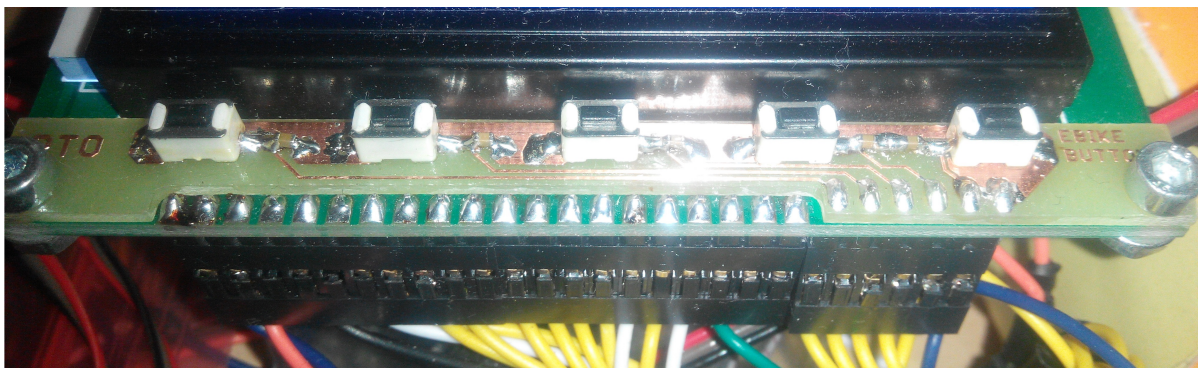
Spojením těchto dvou komponent, tedy displeje a čipu Atmega2560, vzniká vizualizace činnosti například pro dříve řešené 3.4.1 zobrazování teplot z čidel. Pro tuto práci je zapotřebí HMI, tedy mít v blízkosti displeje ovládací prvky. Po krátké rozvaze byla vytvořena PCB s pěti tlačítky, viz obrázek 9. Tato tlačítka budou programově konfigurovatelná, jejich funkci tedy bude možno změnit.



Obrázek 9: Deska plošného spoje pro modul tlačítek

Na obrázku 10 je vidět kompletní HMI ve funkční podobě. Stojí za zmínku snaha o prodloužení pinové lišty displeje nádstavbou tlačítek. Tímto nápadem se zjednodušilo propojování jak v testovací fázi tak i pro následné připojení do hotové desky právě pomocí pinů. Pevnost spo-

jení modulu tlačítek a displeje zajišťují dva M3 šrouby, využívající montážní otvory v displeji. Funkcí tlačítek je přivedení nulového napětí na pin mikroprocesoru. Pro správnou funkci použité logiky musí být v MCU nastaveny vnitřní pull-up resistory. To způsobí, že pokud tlačítka nejsou sepnutá, procesor zaznamenává na pinu obsluhy tlačítek logickou jedničku. Pokud je tlačítko stisknuto, napětí je uzemněno a program detekuje logickou nulu. K omezení překmitů tlačítek jsou použity jak HW tak SW prostředky. Hardwarovým opatřením jsou kapacitory paralelně připojené ke každému tlačítku. Programovým je pak čekání mezi jednotlivými stisky stejného tlačítka.



Obrázek 10: Propojení modulu tlačítek k modulu displeje

### 4.3 Tvorba programového vybavení HMI

V této kapitole bude rozebrán vizualizační systém z pohledu softwarového vybavení. Tedy použitých nástrojů, knihoven a samotného vývoje kódu.

#### 4.3.1 Softwarové prostředky

Jak již bylo řečeno výše, pro tvorbu programu byl využíván Eclipse, program je zapisován v jazyku C a v průběhu psaní kódu je snaha dodržovat MISRA C standard.

Nejprve bylo cílem vytvořit vše speciálně pro tuto práci a nespolehat se tak na knihovny třetích stran. Postupem času se ukázalo, že při současné autorově úrovni znalosti jazyku C není realizovatelné vytvoření programu tak komplexního. Pokud už by vlastní kód obsahoval všechny klíčové funkce, byl by daleko pomalejší a znatelně větší než vytvořené knihovny s optimalizovaným kódem. Po několika měsících práce s textovou sadou displeje a pokusy vytvořit vlastní obslužný program pro zobrazovač byla nalezena knihovna U8glib [13]. Velmi univerzálně napsaná knihovna pro velkou škálu zařízení a to jak displejů, tak architektur řídicích čipů (Arduino, AVR, nebo ARM). Současně je propojena s druhou knihovnou, která nakonec byla v práci rovněž použita, tou je m2tklib. Tento soubor funkcí vytváří podporu pro tvorbu menu a navigaci v obrazovce pomocí tlačítek.



Tyto dvě knihovny spolu tvoří velmi silný nástroj. Poskytuje podporu pro mnoho zařízení, jako jsou potenciometry, rotační enkodéry, snímače, rozšiřující moduly (tzv. Shiedly) k Arduinu aj. Tato kombinace je velmi často využívána například pro poloprofesionální použití jako SW pro HMI u komerčně prodávaných 3D tiskáren. Ukázka spolupráce těchto knihoven je na obrázku 11.



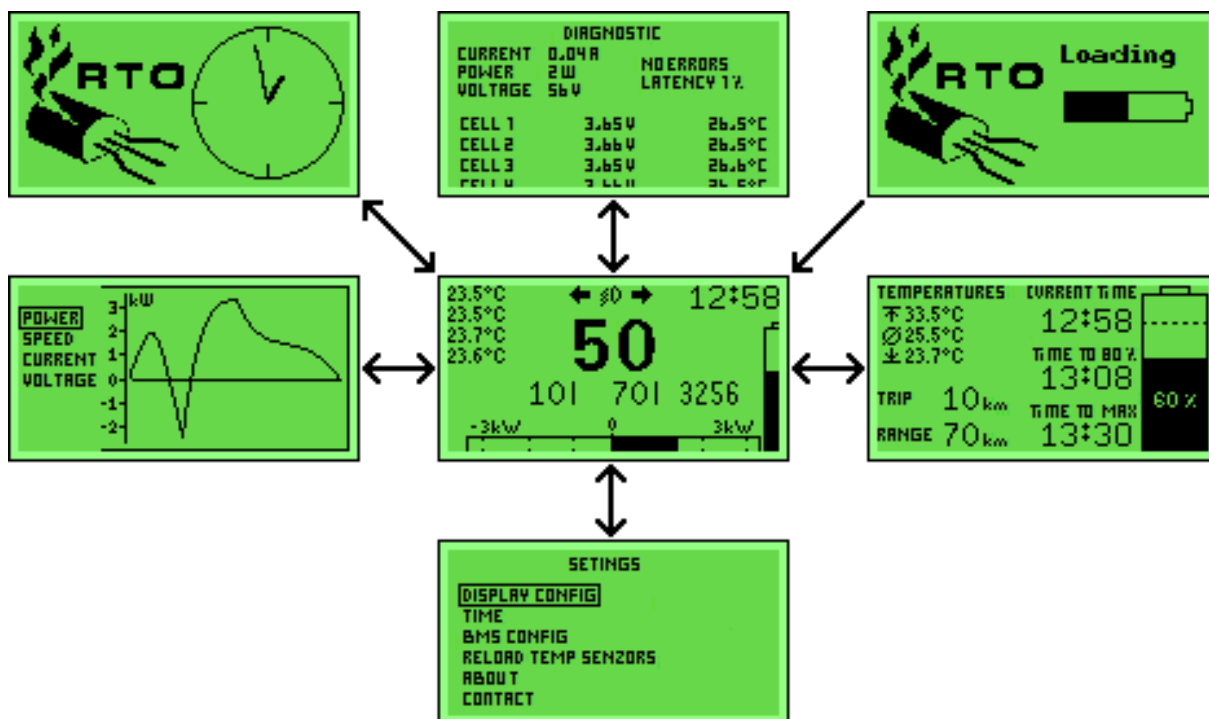
Obrázek 11: Menu zprovozněné v rámci přípravy

#### 4.3.2 Rozvržení obrazovek

Po rozvaze jsme s kolegy dospěli ke koncepci přepínání obrazovek. Každá obrazovka slouží jinému účelu. Jedině tak lze zajistit přehlednost, relevantnost a zároveň komplexnost dat. V plánu je implementace celkem 7 obrazovek viz obrázek 12. V HMI podobně jako v popisování kódu je pro jednodušší přenositelnost použita angličtina. Na některých obrazovkách nebude ovládání potřeba, v jiných bude zásadní. Dříve zmíněná tlačítka jsou programově nastavena na funkce: „dolů“, „nahoru“, „domů“, „vyber“, „zpět“. Tento koncept je poměrně rozšířená a lze předpokládat snadné pochopení způsobu ovládání. Tlačítko „domů“ vždy vyvolá hlavní obrazovku, pokud je stlačeno v hlavní obrazovce, zapne podsvícení displeje na 5 sekund. V obrazovce nastavení, bude využito všech pět tlačítek pro navigaci mezi objekty menu. Pro zvolení položky tlačítko „vyber“ a pro postoupení o úroveň výše tlačítko „zpět“. V obrazovkách grafu a diagnostiky bude možno rolovat mezi možnostmi pomocí tlačítek „nahoru“ a „dolů“.

Systém se po připojení baterie bude načítat, aby jevil známky činnosti. Pro tyto účely je vytvořena obrazovka, která informuje operátora, že načítání probíhá. Zatím není implementován





Obrázek 12: Obrazovky vizualizace. Obrazovka (popisováno zleva) úsporného režimu, diagnostiky, načítání, grafu, hlavní, nabíjecí a nastavení

plnohodnotný program, ale je možné, že inicializace celého systému může trvat jednotky nebo dokonce desítky sekund. Pokud by po tuto dobu systém nejevil známky činnosti, neznalý uživatel by mohl získat mylnou představu o poruše systému.

Po inicializaci všech periférií přejde systém samočinně do hlavní obrazovky. Ta slouží za jízdy jako náhled do většiny důležitých údajů. Dominující je cifra 50, která znamená okamžitou rychlost v km/h. Pod rychlostí se nalézají tři čísla oddělená svislou čarou. Tato čísla reprezentují ujetou vzdálenost (od posledního nabití), orientační vzdálenost, kterou je možno při aktuálním průměru vydané energie na km ještě ujet, a celkový počet najetých km s vozidlem. Pod těmito čísly se nachází bargraf zobrazující okamžitý výkon soustavy v kW. Na levé straně hlavní obrazovky je zobrazeno několik teplot. Prozatím jsou zobrazovány všechny naměřené teploty. Nad ukazatelem rychlosti se nachází trojice piktogramů, a to směrovka vlevo, vpravo a symbol světel. Symbol světel má dvě podoby, obdobně jako v autech jde o potkávací světla a dálková světla. Dále po směru hodinových ručiček se nalézají hodiny zobrazující aktuální čas. Posledním prvkem hlavní obrazovky je bargraf baterie zobrazující přibližnou úroveň stavu nabití baterie.

Z hlavní obrazovky je možno pomocí čtyř tlačítek přejít na čtyři podružné obrazovky. Některé z nich jsou automaticky vyvolány při nějaké události.

Obrazovka nabíjení bude druhou nejpoužívanější vizualizací. Zobrazí se automaticky při začátku nabíjení baterie. Obsahuje data důležitá pro uživatele, zejména čas dobití na 80% kapacity, čas plného dobití a odhad dojezdu na aktuální kapacitu baterie jako nejdůležitější z údajů. Dále

je zobrazena nejvyšší, nejnižší a průměrná teplota v baterii na článcích (viz kapitola 3.5) a velký bargraf, opět ve tvaru baterie, signalizující úroveň nabití. Navigační tlačítka na této obrazovce nemají funkci.

Diagnostická obrazovka je druhou v pořadí, která automaticky zobrazí nějaké události. Tou událostí je jakákoliv chyba zasláná z BMS. Zobrazí se na místě, kde je nyní nachází text „NO ERRORS“. Pod tímto textem je pojem latency a údaj v procentech. Pojem latency, česky latencí, se v technických oborech zabývajících se přenosem dat označuje ztrátovost komunikace. V tomto případě se ztrátovostí rozumí ta část zpráv z BMS, kterým nesouhlasil CRC z celku. Dále jsou zobrazena data z výstupu BMS, tedy napětí, proud a výkon. Pod těmito daty následuje seznam článků v BMS a u každého článku je zobrazena aktuální hodnota napětí a teploty. Mezi těmito daty lze rolovat pomocí navigačních tlačítek. Tlačítko „vyber“ a „zpět“ nemají funkci.

Vizualizační okno s grafem je pokusem, jak vnést do systému určitý způsob zaznamenávání telemetrie vozidla za jízdy. Vzhledem k malému rozlišení displeje je toto ve fázi vývoje a je možné, že bude graf nahrazen tabulkou hodnot, jako je tabulka 2. Mezi různými veličinami je možno přepínat pomocí navigačních tlačítek. Uvažovanými veličinami jsou napětí baterie, okamžitý výkon soustavy, proud a rychlost. Vždy je zobrazen pouze jeden průběh. Tlačítko „vyber“ a „zpět“ nemají funkci.

Další z obrazovek je nastavení. Zde je možnost nastavit několik parametrů BMS. Znovu načíst senzory na sběrnici 1-Wire, nastavit čas, kontrast, jas a přečíst si o programu a autorech. Postupem času zde bude možnost nastavení Bluetoothu, GPS modulu, akcelerometru, ukládání na SD kartu a podobně. Tato obrazovka využívá všechna tlačítka.

Poslední z obrazovek je úsporný režim. Tato obrazovka se aktivuje automaticky po několika minutách nečinnosti vozidla i HMI. Na obrazovce je logo RTOstrava a čas v podobě ciferníkových hodin. Po stisku jakéhokoliv tlačítka, nebo uvedení vozidla do pohybu se úsporný režim ukončí a systém se navrátí na hlavní obrazovku.

Na obrázku 13 jsou zachyceny pokusy implementace vizualizace do systému.



(a) Hlavní obrazovka na displeji

(b) Logo RTO na displeji

Obrázek 13: Implementace vizualizací do HMI

Logo, které je použito pro načítací a úspornou obrazovku, je znakem Robotického Týmu

Ostrava. RTO je skupina 4 studentů (včetně autora této práce a autora diplomové práce na téma BMS) spolupracujících na projektech. Kromě značných úspěchů v oblasti robotiky se zabývá právě také elektromobilitou. Impuls k výzkumu a vývoji elektrokoloběžek pochází právě odtud.

## 5 Realizace provozních testů

Tato kapitola pojednává o hardwarových úpravách na elektrokoloběžce a jejich důsledcích pro jízdní vlastnosti.

### 5.1 Volba komponent pro stavbu koloběžky

Pro sestavení elektrokoloběžky je potřeba v první řadě rám. Odolný rám z lehkých slitin, který snese vysoké zatížení ve vyšších rychlostech. Vzhledem k požadavku na průjezd terénem je potřeba vyšší stupátko a obecně propracovanější konstrukce, která se nikde nedeformuje. Vzhledem k možnostem bylo rozhodnuto vybrat rám z komerčně dostupných a prodávaných koloběžek. Bylo odzkoušeno a proměřeno několik modelů koloběžek od výrobců jako je Yedoo, nebo Kostka. Byla odhadnuta požadovaná minimální nosnost na 120kg, a to pro rezervu hmotnosti pro komponenty elektrifikace. Už jen toto omezení vyřadilo značnou část kandidátů. Následoval výběr ve specializovaných obchodech, protože bylo nutno odzkoušet tuhost rámu. Většina koloběžek firmy Kostka byla stavěná pro městský provoz, cyklostezky, nebo cesty. Rám těchto vozidel byl pružný poddajný a při troše snahy nebyl problém prohnout stupátko až k podlaze. Pouze koloběžka od České firmy Yedoo byla stavěná do terénu a podle toho byl tvořen i rám. Pevný, neohebný ze silnějších profilů. Od této firmy jsme si vyžádali starší model, protože novější měl členitější rám a nižší nosnost. Výhodou této koloběžky bylo kromě vyššího stupátka, nosnosti a pevnosti rovněž fakt, že byla dodávána s kotoučovými brzdami. Koloběžka Mezeq je na obrázku 14.



Obrázek 14: Fotografie koloběžky Mezeq

Motor byl volen s ohledem na požadované parametry spolehlivosti, bezúdržbovosti, mechanická jednoduchosti, rozumné maximální rychlosti, nízká hmotnosti a velikosti. Ideálně i vodotěsnost a prachotěsnost. Pokud lze hovořit o spolehlivosti a bezúdržbovosti, je nutno vyřadit stejnosměrné motory. Jejich slabinou je přítomnost komutátoru. Další možností je montáž ja-

kéhokoliv dalšího motoru mimo kolo a nebo do kola. Montáž mimo kolo vyžaduje zpřevodování otáček motoru na hnané kolo pomocí řetězu či řemenu. To je však v rozporu z mnohými parametry vytyčenými výše, zejména z požadavkem mechanické jednoduchosti a bezúdržbovosti. Vyhovuje tedy pouze motor vestavěný v kole. Do náboje kola se vestavují pouze bezkartáčové stejnosměrné motory, tedy BLDC, čímž bylo rozhodnuto o výběru konstrukce motoru. Výrobci těchto motorů není mnoho, v České Republice byly dostupné pouze motory Kanadské firmy Golden motor. Opět byla možnost volby z několika generací motorů, ale všechny novější typy měly řídicí jednotku vestavěnou přímo do statoru motoru, což bylo nežádoucí pro zamýšlenou výrobu vlastní řídicí jednotky. Z těchto důvodů byl zvolen motor Magic pie 2 vestavěný v ráfku 16 palcového kola. Udávaný výkon má 500/750/1000W při napětí akupacku 24/36/48V.

V době nákupu komponent bylo na trhu několik možností jak vytvořit baterii pro elektrifikaci vozidla. Práce [12], která je zpracovávána paralelně s touto, se do hloubky zabývá výběrem článků a odůvodněním tohoto výběru. Prvním důležitým hlediskem je výběr typu článků. Na trhu je možno koupit olovené (Pb-acid), nikl – metal hydridové (Ni-MH), nikl kadmiové (Ni-Cd), a celou řadu primárních článků založené na Lithiu (Li-ion). Na obrázku 15 z literatury [11] je uveden souhrn vlastností, který odůvodňuje výběr lithiových článků. A to zejména hustota energie a efektivita.

	Pb-acid	Ni-MH	Li-ion
<i>Theoretical</i>			
Voltage (V)	1.93	1.35	4.1
Specific energy (Wh/kg)	166	240	410
<i>Practical</i>			
Specific energy (Wh/kg)	35	75	150
Energy density (Wh/L)	70	240	400
Coulometric efficiency	0.80	0.65–0.70	>0.85
Energy efficiency	0.65–0.70	0.55–0.65	~0.80
Specific power, 80% DOD (W/kg)	220	150	350
Power density (W/L)	450	>300	>800

Obrázek 15: Přehled technologi sekundárních článků

Jendou z možností je použití Li-ion ( $\text{LiCoO}_2$ ) článků s malou kapacitou a jejich spojení po desítkách až stovkách kusů pro dosažení optimálního napětí a kapacity. Toto spojování je v našich podmínkách neefektivní, nekvalitní a nebezpečné. Servis jednoho článku si vyžádá rozebrání celé baterie, a ta musí být díky přítomnosti Lithia velmi dobře mechanicky i vodě odolná, což znamená složité rozebírání. Články  $\text{LiFePO}_4$  (lithium železo fosfát) jsou vyrobitelné v jakékoliv kapacitě (tedy spojují se pouze sériově za účelem zisku vyššího napětí), vynikají vyšší bezpečností, zejména pak menší rizikovostí požáru při poruše (zkrat, přebití atd. . .) Praktické zkušenosti vývojářů a uživatelů hovoří i o větší toleranci k nedodržení maximálního a minimálního napětí. Oproti Li-ion mají rovněž vyšší počet cyklů. Počet cyklů znamená delší životnost,

tedy menší výdaje na nové články a více najetých km při správném zacházení, což je pro student-skou práci důležitým aspektem. Baterie LiFePO<sub>4</sub> byly voleny s ohledem na charakter práce. Ve výrobě prototypu se může objevit chyba v konstrukci, zkrat, špatně navržená elektronika. Dalším důležitým požadavkem je tedy zajištění bezpečnosti. Z těchto důvodů byla vybrána baterie se šestnácti primárními články LiFePO<sub>4</sub> s kapacitou 15Ah. Celá baterie tedy bude dosahovat následujících parametrů: napětí článků 59.5V – maximální; 51.5V – nominální; 40V – minimální; kapacity 15Ah, maximálního dlouhodobého vybíjecího proudu  $2C = 30A$ ; maximálního špičkového proudu  $3C = 45A$  a konečně garantovaného počtu cyklů vyššího než 2000 při poklesu kapacity maximálně na 80%.

## 5.2 Architektura rozmístění komponent

Možností rozmístění motoru nebo článků je více a je nutno zvolit nejlepší kombinaci pro optimální jízdní vlastnosti elektrokoloběžky.

### 5.2.1 Umístění hnaného kola

Náhon na přední kolo nemá žádné významné výhody kromě lepšího rozložení hmotnosti na kola a teoreticky vyšší maximální rychlosti u koloběžek s větším předním kolem. Akcelerací při rozjezdech nevyuniká. V terénu nemá potřebnou efektivitu díky častým ztrátám styku kola se zemí, obzvláště pokud je osazena přední odpružená vidlice. Řízení je pochopitelně těžší, protože kromě odporu řídicích a kola musí řidič překonávat i setrvačnost 7kg motoru. Rovněž vzniká nežádoucí gyroskopický efekt, který značně zhoršuje ovladatelnost vozidla. Horší je i celková dostupnost motoru z hlediska přivedení kabelů. Ty musí být přes krk koloběžky přivedeny vně a tím esteticky i funkčně překážejí. Naproti tomu uložení motoru do zadní vidlice ovladatelnost koloběžky nezhorší. Kolo bude mít lepší kontakt s podložkou a gyroskopický efekt bude mít tendenci vozidlo stabilizovat pro zachování ovladatelnosti. Jistou nevýhodou je soustředění hmotnosti na zadní kolo, kde se předpokládá větší podíl hmotnosti jezdce. Po zvážení těchto faktů bylo rozhodnuto použít zadní uložení motoru.

### 5.2.2 Uložení článků

Pro uložení článků se naskýtá rovněž více možností. Vzhledem k jejich nezanedbatelné hmotnosti je však nutno myslet na polohu těžiště a uložit články co nejnižší. Výška těžiště značnou měrou ovlivňuje jízdní vlastnosti vozidla. Například koncepce elektrokola s uložení baterie na nosiči nad zadním kolem se jeví jako naprosto nevhodná právě ze zmíněného důvodu. Moderní elektrokola nesou baterii ve středu kola nad pedály, tedy co nejnižší.

Baterie pro koloběžku, která je předmětem této práce, jsou díky vybrané technologii a nadstandardní kapacitě poměrně těžké. Varianta s 16 články o kapacitě 15Ah má hmotnost přibližně 7.5kg, varianta 16 článků s kapacitou 20Ah dokonce 10.5kg. Byly zvažovány tři možnosti uložení článků. Prvním je způsob, který je využíván většinou konstruktrů elektrokoloběžek, například



českým Perutem a polským Hulerem 16a. Tím je uložení článků do stupátka koloběžky. Tady je na zvážení použitelnost koloběžky v případě, že dojde energie. Obzvláště pokud se jedná o koloběžku do terénu, která má mít vyšší světlou výšku (výška mezi podložkou a stupátkem). Terénní koloběžka Mezeq má světlou výšku 8cm (stupátko je ve výšce 11.5cm). Pokud přidáme minimální výšku baterií 5cm a 1cm bude sloužit jako krytí a izolační bezpečnost článků je výška rovna 15cm. Odrážení se z takové koloběžky nebude dlouhodobě příjemné. Dalším způsob uložení článků je nápadem autora této práce. Články by měly být rozmístěny ve štítu před nohama jezdce podobně jako například na skútrech 16b. Tento typ uložení má několik kladů: články jsou lépe chlazené, nohy jezdce jsou chráněny proti přímému větru a kamení odlétávajícímu od kol ostatních účastníků provozu a konečně stupátko je nezvýšené, tedy potenciální používání elektokoloběžky jako obyčejné koloběžky by nemělo činit problém. Mezi nevýhody patří zejména zvýšení těžiště, dále pak prodloužení vzdálenosti silových vodičů od motoru a tím zvýšení ztrát a snížení efektivity. Poslední zvažovanou možností rozmístění akumulátoru je způsob obdobný elektrickým vozidlům pro imobilní občany 16c, tedy pod místem, kde se sedí. Tento způsob však přetěžuje zadní kolo. Hmotnost motoru činí 7kg, hmotnost článků 11kg a hmotnost řidiče nacházející se na sedátku nad zadním kolem až 100kg. Na trhu se v současné chvíli nevyskytují pláště v daném rozměru s nosností nad 85kg. Další nevýhodou je možná ztráta styku předního kola s podložkou a tím ztráta ovladatelnosti při prudké akceleraci koloběžky. Při takovéto události hrozí zranění při překlopení vozidla. Výhodou této konfigurace jsou extrémně krátké vodiče od baterie do řídicí jednotky i do motoru. Další výhodou je zátěž zadního kola a tím jeho garantovaný styk s podložkou i v případě odrážení. Pro výzkum a vývoj bylo zvoleno uložení článků do stupátka.



(a) Koloběžka Huler

(b) Skutr s čelním štítem

(c) Elektrické vozidlo pro imobilní

Obrázek 16: Možnosti rozmístění článků ve vozidle

### 5.3 Provozní testy nultého prototypu s Li-ion bateriemi

Takzvaný nultý prototyp byl stav, kdy se čerstvě přestavěná sestavená koloběžka doplnila o elektromotor, řídicí jednotku a zrovna dostupnou baterii z elektrokola. Baterie byla bohužel špatně zdokumentovaná a tak o ní lze s jistotou říci pouze to, že její nominální napětí bylo 36V a s největší pravděpodobností byla kapacity cca 5.6Ah. S takto osazenou koloběžkou (viz obrázek 17) bylo podniknuto několik zkušebních jízd, aby byly otestovány její jízdní vlastnosti. Maximální rychlost byla cca 22 km/h, což byla hodnota pod očekávaným výsledkem.



Obrázek 17: Fotografie nultého prototypu

### 5.4 Provozní testy prvního prototypu s Pb bateriemi

Pro původní projekt elektrokoloběžky byla plánována baterie s nominálním napětím 24V, tedy měření s vyšším napětím bylo irelevantní a bylo třeba provést měření s podobným napětím jako v případě plánovaných podmínek. Z tohoto důvodu byly zvoleny dvě trakční olovené baterie, každá o nominálním napětí 12V, tedy dohromady 24V. Tento zdroj energie má omezení, zejména dlouhodobá zátěž nebo nízká teplota degradují schopnosti akumulátorů dodat potřebný proud. V podmínkách, kdy potřebujeme čerpat dlouhodobě vyšší proudy, není možno využít celou kapacitu olovené baterie. Rovněž stojí za zmínku, že baterie poskytující napětí 24V v olovených článcích má hmotnost cca 24kg, což je vzhledem k 8kg stejného napětí v LiFePO<sub>4</sub> bateriích markantní rozdíl, obzvláště má-li být koloběžka přenositelná. Podobné rozdíly panují i v rozměrech. Pro krátkodobé pokusy v letních teplotách při patřičném nabití byla tato alternativa připuštěna jako provozuschopná. Pro naměření dat kvůli následné analýze bylo použito datalogeru Speedict Mercury, obrázek 18.

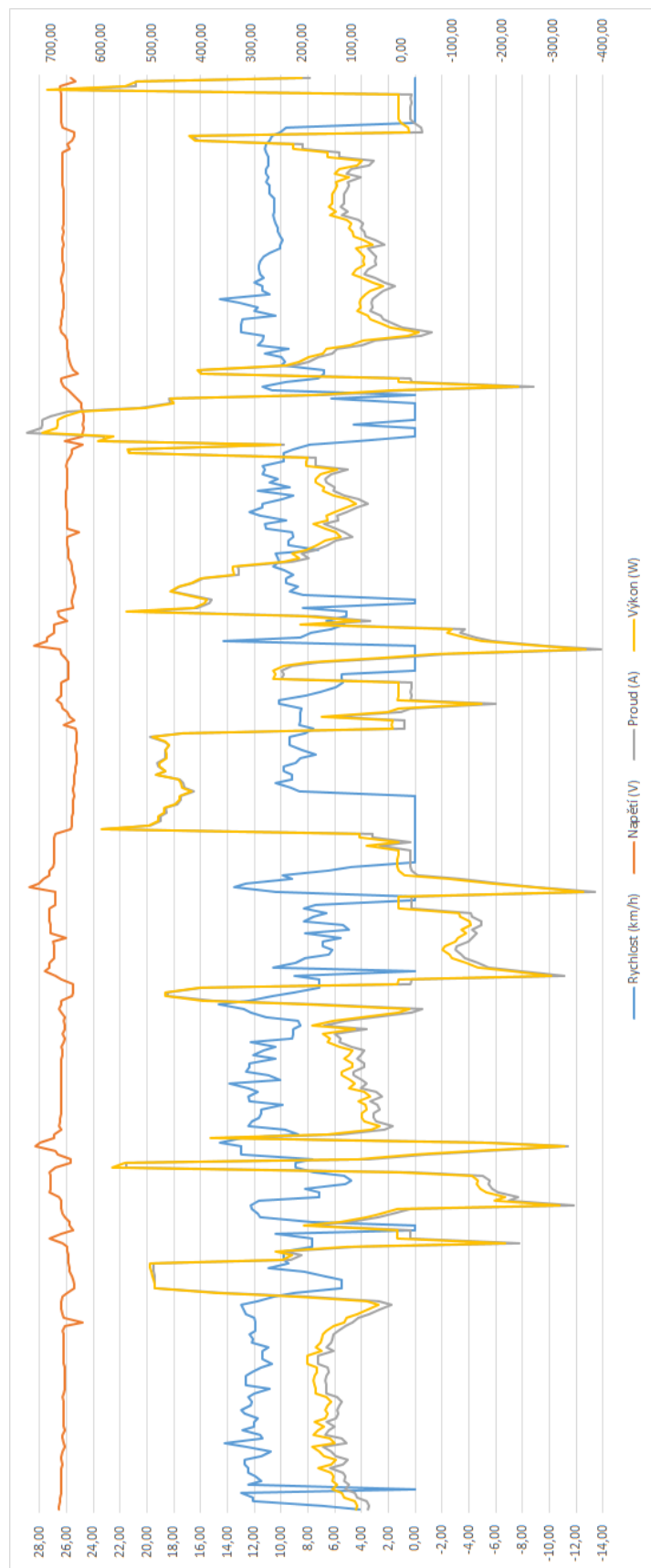




Obrázek 18: Nástroj pro záznam provozních dat Speedict Mercury. Převzato z [10]

Toto zařízení má dvě užitečné funkce. Jednak je schopno zaznamenávat napětí a proudy z baterie do systému, ale také je zde možnost používat telefon spárovaný pomocí protokolu Bluetooth jako palubní počítač a mít tak živá data o rychlosti napětí, proudu, výkonu teplotě, ale také zbývající kapacitě baterie.

Další fází bylo tedy testování koloběžky na 24V. To je díky použití datalogeru zaneseno v grafu 19. Z údajů získaných z testovacího provozu lze vyčíst, že při napětí baterie 24V (max cca 28V) lze dosáhnout rychlosti maximálně 15km/h. Tato rychlost dosahovala nižších hodnot, než bylo předpokládáno, a proto bylo nutno před dalším postupem navrhnout způsob, jak ji zvýšit.



Obrázek 19: Graf průběhu provozních veličin testování nultého prototypu

## 5.5 Elektronická převodovka

Díky poznatkům z nultého a prvního prototypu bylo k dispozici několik variant, jak postupovat dále ve zvyšování rychlosti a tím užité hodnoty tohoto vozidla. Všechny motory integrované v náboji kola jsou mnohapolové BLDC motory s velkým poloměrem rotoru. To zaručuje, že budou mít dostatečný točivý moment, i když jsou přímo spojeny s hnaným kolem a nemají tak možnost žádného převodu. Nevýhodou těchto motorů je však fakt, že mají nízké otáčky. V kombinaci s malým průměrem hnaného kola koloběžky a nízkým napětím baterie dostáváme velice omezenou maximální rychlost. Pokud maximální rychlost nestačí, nezbyvá než zvýšit napětí baterie, nebo motor v náboji rozebrat a pokusit se přepojit typické zapojení fází do hvězdy tak, aby byly zapojeny do trojúhelníku. Tato operace má však za následek pokles točivého momentu motoru. Tedy jako ideální varianta byla zvolena přestavba motoru tak, aby bylo možné za běhu měnit zapojení fází hvězda - trojúhelník. Spolu s tímto bylo zvýšeno napětí na 48V.

Před první zásahem do motoru byly odhadnuty následující hodnoty:

Pokud při hodnotě napětí baterie 24V je rychlost cca 15km/h a při hodnotě napětí 36V je 22km/h, měla by být rychlost na 48V baterii rovna cca 29km/h. Z literatury [?] a [2] lze vyčíst, že přepnutím z hvězdy do trojúhelníku lze zvýšit otáčky (a tím maximální rychlost) 1.73 krát a snížit točivý moment 0.58 krát. Teoreticky by mělo dojít k navýšení rychlosti při 24V z 15km/h na 25km/h, na zamýšlené hodnotě napětí pro finální produkt, tedy 48V, z 29km/h na 50km/h. S touto vizí začala přestavba vnitřního uspořádání motoru.

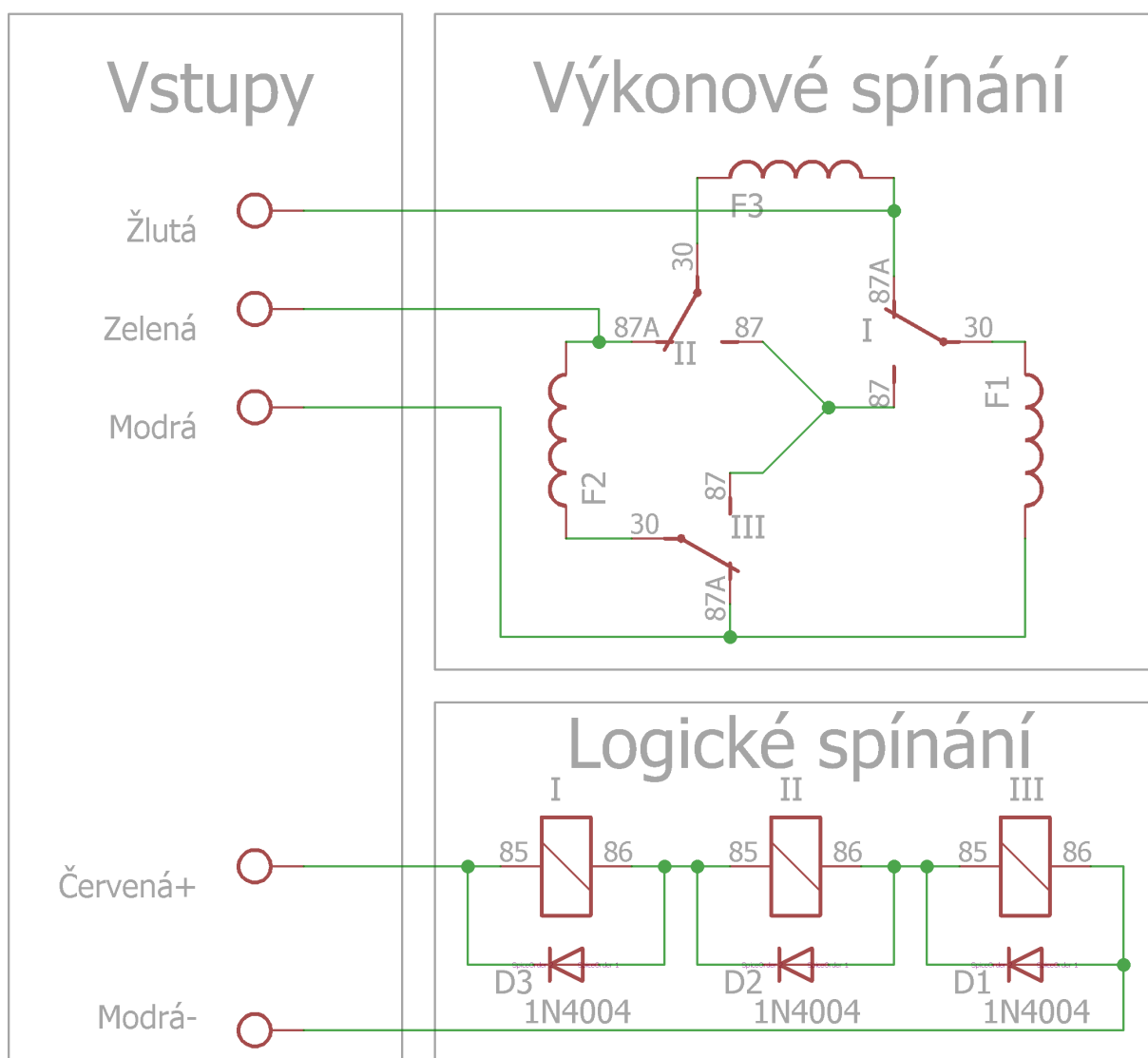
### 5.5.1 Přestavba motoru

Nejprve bylo potřeba motor rozlisovat. Tato operace byla složitá a vyžádala si několik pokusných nástavců, než se pomocí hydraulického zvedáku, vinařského lisu a představce podařilo rozlisovat motor. Motor totiž drží kromě desítky šroubů obrovská síla neodymových magnetů.

Následně došlo ke zmapování situačního rozložení vnitřních prostor motoru. Dle očekávání zde byl motor zapojen do hvězdy, a to tak, že vinutí všech tří pólů bylo na jednom místě spájeno (svařeno cínovou pájkou) dohromady. Bylo tedy potřeba tento bod uvolnit, a vymyslet a naaranžovat rozmístění relé uvnitř statorového prostoru.

Elektromagnetická relé byla volena s ohledem na proudy a místo použití jako 60A automobilová relé s cívkou ovládanou 7.8 – 15.5V napětím. Tyto parametry byly ideální pro spínání jak na 24V tak i později na 48V. Maximální špičkový proud řídicí jednotkou je 50A, kontinuální 30A. Tedy relé byla zvolena s dostatečnou výkonovou rezervou. Pro usazení těchto relé do statoru byly vytvořeny výtisky na 3D tiskárně. Dalším krokem byla volba režimu, který je upřednostňován. Tedy pokud nebude na cívku relé přivedeno napětí, které bude použito. Po rozvaze byl zvolen režim propojení fází trojúhelníku, a to z následujícího důvodu. Tento motor se vplétá do různých kol, a to od nejmenšího 16 palcového kola, které bylo použito i v této práci, až po 26 palcové kolo pro jízdní kola k elektrifikaci. Dané číslo v palcích udává průměr ráfku kola. Pokud budeme vycházet z definice momentu, tedy rameno krát síla, je zřejmé, že poloměr je nejdůležitější

parametrem při daném výkonu motoru. Jestliže v této konfiguraci práce je velikost poloměru hnaného kola i s pláštěm okolo 23cm, a na elektrokole s 26 palcovým kolem je poloměr 36cm. Točivý moment při stejném výkonu motoru je 0.64 krát menší u kola s větším průměrem. Výše bylo zmíněno, že při změně transfigurace z hvězdy na trojúhelník se změní moment přibližně 0.58 krát. Vzhledem k výkonové a zejména momentové rezervě, které motory pro elektrokola musí mít, lze konstatovat, že točivý moment při zapojení fází motoru do trojúhelníku na 16palcovém výpletu bude podobný jako točivý moment na originálně použitém 26palcovém kole. Zejména z těchto důvodů byl zvolen jako přednastavený, nebo chceme-li klidový, režim jako konfiguraci trojúhelníku a přivedením napětí na spínací cívky se tento režim přepne do konfigurace hvězda. Schéma zapojení je k vidění na obrázku 20.



Obrázek 20: Schéma zapojení elektronické převodovky

Vzhledem ke složitosti rozlisování motoru bylo vše vytvářeno pro maximální odolnost celého

zařízení. Vše bylo zataveno v teplém smrštitelných bužírkách a přichyceno k nosným prvkům statoru. Na obrázku 21 lze vidět finální usazení elektroniky před zalisováním černé objímky držící elektromagnetická relé, jež jsou navržena a vytištěna na 3D tiskárně speciálně pro tento účel.



Obrázek 21: Vnitřní rozložení motoru

Na obrázku 22 je celý prototyp jedna po dokončení přestavby elektronické převodovky, před testovací jízdou.

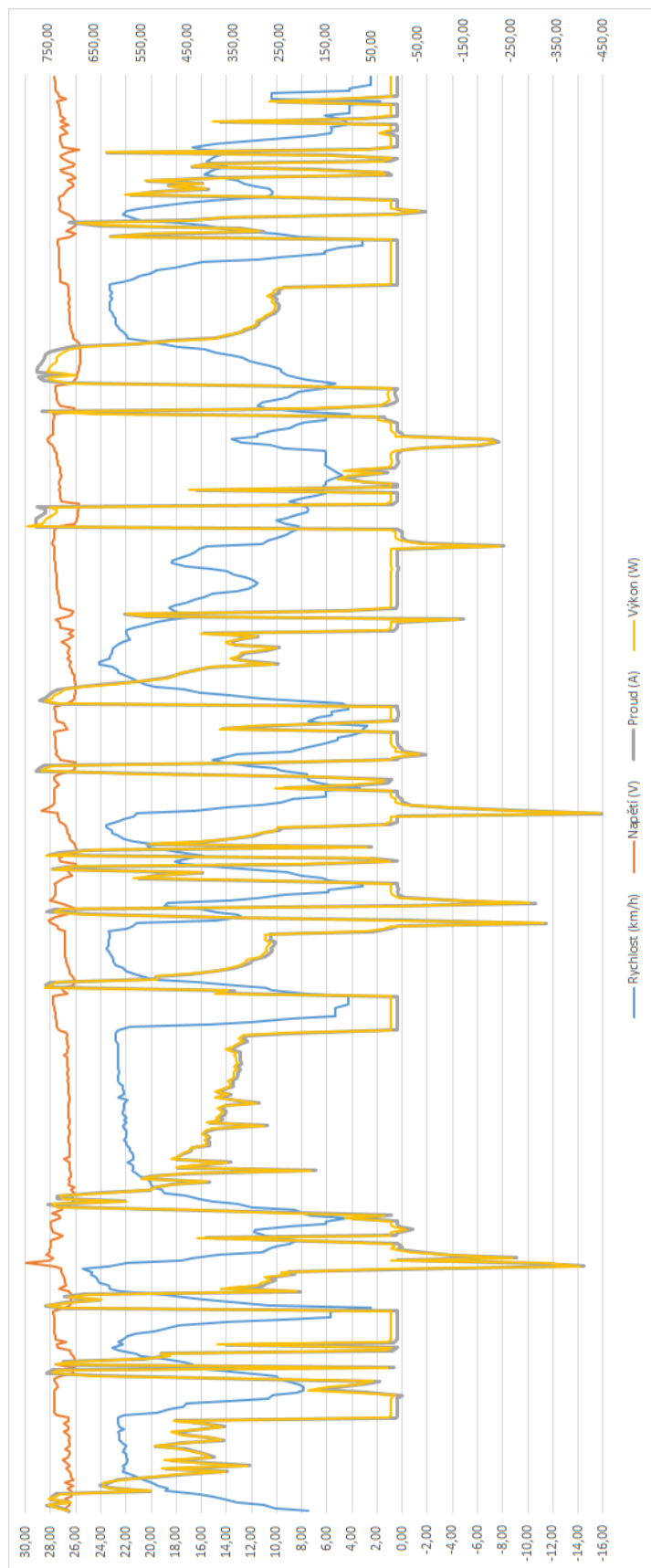


Obrázek 22: Hotový prototyp jedna po dokončení elektronické převodovky

Testovací jízda byla celá realizována v trojúhelníkovém režimu, aby se prokázaly nebo vyvrátily teoretické předpoklady o maximální rychlosti a točivém momentu. Záznamy z datalogeru jsou znázorněny v grafu 23. Točivý moment nebyl měřen přímo, nicméně pro naši aplikaci stačí, že byl dostačující pro rozjezd koloběžky a dokonce byl tak vysoký, že se pocitově akcelerace nijak nezměnila. Maximální rychlost stoupla téměř přesně podle výpočtů na maximálních 24km/h, později po přezutí pláštů na zátěžové pro elektrokola a dohuštění duší dokonce na 26km/h.

Oproti grafu 19 lze vypočítat nárůst výkonu cca o 80W v obou směrech, tedy jak do motoru tak do baterie. Dle teorie měl být výkon u obou rozložení fází totožný nebo v trojúhelníku o něco nižší vlivem parazitních proudů ve smyčce trojúhelníku. Proto je vyšší výkon přisuzován olověným článkům, které při prvním experimentu byly vytaženy ze skladovacích podmínek, na rychlo dobity ze zdroje a následně použity, zato při novém experimentu byly již „zformátovány“ několika jízdami a také „citlivě“ dobíjeny modelářskou nabíječkou. Proto na rozdíl výkonů není brán zřetel.





Obrázek 23: Graf průběhu provozních veličin testování prvního prototypu

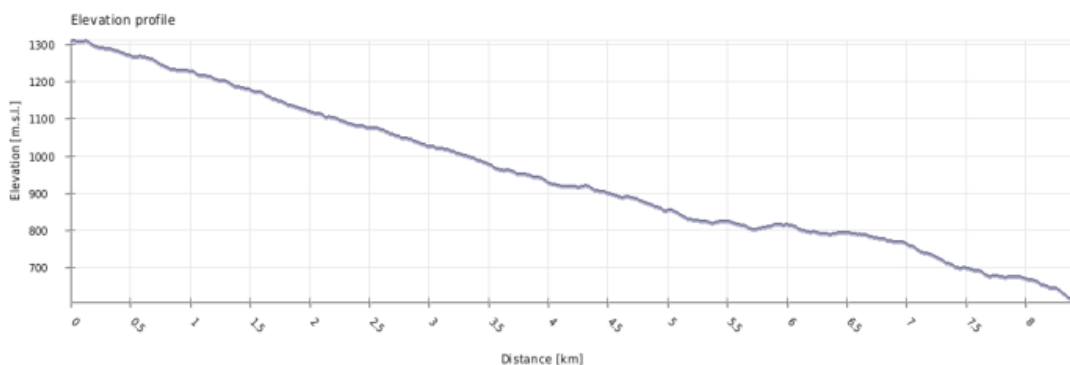
## 5.6 Měřicí experiment v terénu

Pro komplexní výsledky zahrnující reálné a zároveň nejhorší možné podmínky byla zvolena zátěžová zkouška v terénu. S prvním prototypem byl uskutečněn výjezd a sjezd Lysé hory, tedy nejvyšší hory Beskyd. Pro optimální výsledky měření a zároveň bezpečnost byla zvolena trasa z Dobré namísto strmější trasy na vrchol z Ostravice. Rovněž byl jako testovací čas zvolena noc, kdy se nepředpokládal provoz automobilů ani turistický ruch.

Experiment začal na parkovišti u obce Krásná, kde byl vyložen, sestaven a zprovozněn prototyp koloběžky a připojen dataloger. Po několika desítkách metrů bylo zjevné, že trojúhelníková transfigurace nebude na výjezd použitelná a bylo přepnuto na hvězdu. Rozložení fází do hvězdy se ukázalo účinné, koloběžka byla schopna jet samostatně do kopce rychlostí 4-10km/h, a to s celkovou hmotností přibližně 145kg. Ta se skládala ze dvou trakčních olovených akumulátorů, jeden s hmotností 12kg, motoru cca 7kg, rámu koloběžky přibližně 12kg a pochopitelně řidiče, který i s ochranným oděvem a batohem mohl dosahovat hmotnosti kolem 100kg.

Jak uvádí literatura [4], olovené články nejsou schopny při vysokých proudech poskytnout celou svou elektrickou kapacitu. Jako hrubý odhad dojezdu koloběžky bylo před cestou uvažováno následovně. Pokud bude uvažovaná kapacita obou olovených trakčních baterií 44Ah na napětí 24V, a průměrná spotřeba při cestě nahoru byla 20A a rychlost 5km/h, měla by koloběžka za dvě hodiny ujet přibližně 10 km do kopce (proud 20A). Z parkoviště lokality Krásná Papežov je vzdálenost k vrcholu Lysé hory 8,5km, takže teoreticky by koloběžka měla i s nákladem vyjet na vrchol s rezervou 15% kapacity.

Problém nastává v elektrické měkkosti olovených akumulátorů jakožto zdroje velkých proudů. Oba akumulátory byly nabity na maximální napětí (a tedy plnou kapacitu) 28V, ale po několika metrech kleslo vlivem velkého vnitřního odporu baterií a vysokého odběru až pod hodnotu 20V. Tím se potřebný výkon pro elektromotoru zvýšil požadavek na proud. Pokud bychom uvažovali ideální elektrický zdroj s nulovým vnitřním odporem, bude pro provozování 500W motoru (v nejhorším možném případě) potřeba  $500/28 = 17.85\text{A}$ . Pokud ale vlivem takto vysoké hodnoty proudu poklesne napětí na zdroji na 20V, bude již proud  $500/20$ , tedy 25A, což je hodnota vzhledem ke kapacitě baterií značně vyšší.



Obrázek 24: Výškový profil trasy Papežov - Lysá hora



Na obrázku 24 je znázorněn výškový profil trasy. Lze konstatovat, že jde o monotónní stoupaní. Koloběžka byla schopna jízdy zhruba do vzdálenosti 6km, tedy 2.5 km pod vrchol. V tu chvíli již byly rychlosti tak nízké, že se jízda stala nepohodlnou a neefektivní vzhledem k rychlosti chůze. Poslední 2km tedy byla koloběžka využita pouze jako vývoz zavazadla a chodítko, tady vlivem daleko menšího potřebného výkonu sloužila skvěle. Na vrcholu došlo ke kontrole celého vozidla a přípravě ke sjezdu, která zahrnovala zejména přípravu ochranného oděvu pro řidiče a instalaci svítilny pro vozidlo.

Sjezd měl otestovat několik parametrů motoru, řídicí jednotky a baterie. Hlavním předmětem experimentu byla možnost rekuperace v obou režimech, tedy hvězdy i trojúhelníku, okamžitý výkon, který je schopen motor dodat skrze řídicí jednotku do baterií. A rovněž rychlost, na které se vozidlo ustálí při rekuperaci. Pro sjezd byl použit mód trojúhelníku. Na datalogeru byl spuštěn nový záznam.

Cesta dolů trvala přibližně 19 minut se dvěma zastávkami (součtem 1.5 minuty). Průměrná rychlost byla 27km/h, maximální rychlost 40km/h, maximální spočtený výkon dodaný do motoru byl přibližně 700W. Maximální výkon dodaný do baterií byl 1252W. Spotřebovaný výkon byl 14.15Wh a dodaný výkon pomocí rekuperace byl 141Wh. Další veličiny uvádí tabulka 2.

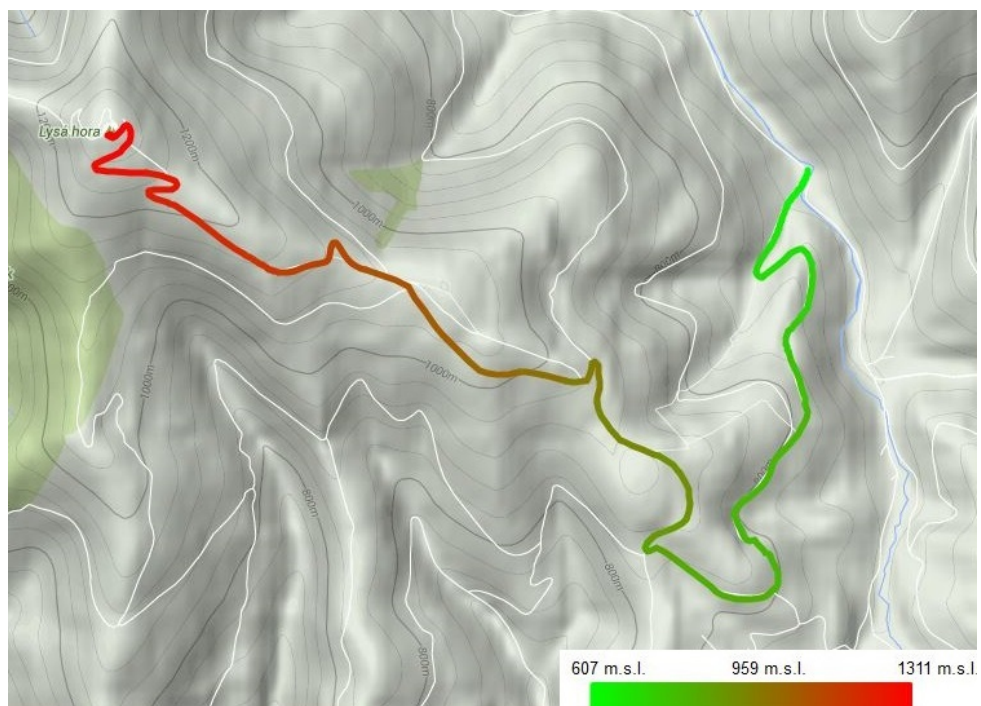
	Rychl.(km/h)	Napětí(V)	Proud(A)	Výkon(W)	Energetická bilance(Wh)		
Max	39.40	31.21	27.45	694.38			
Avg	26.93	28.22	-13.22	-401.44	Spotřeba	Produkce	Bilance
Min	0.00	21.14	-41.22	-1251.85	14.15	141.38	127.23

Tabulka 2: Shrnutí výsledku měření jízdy z Lysé hory

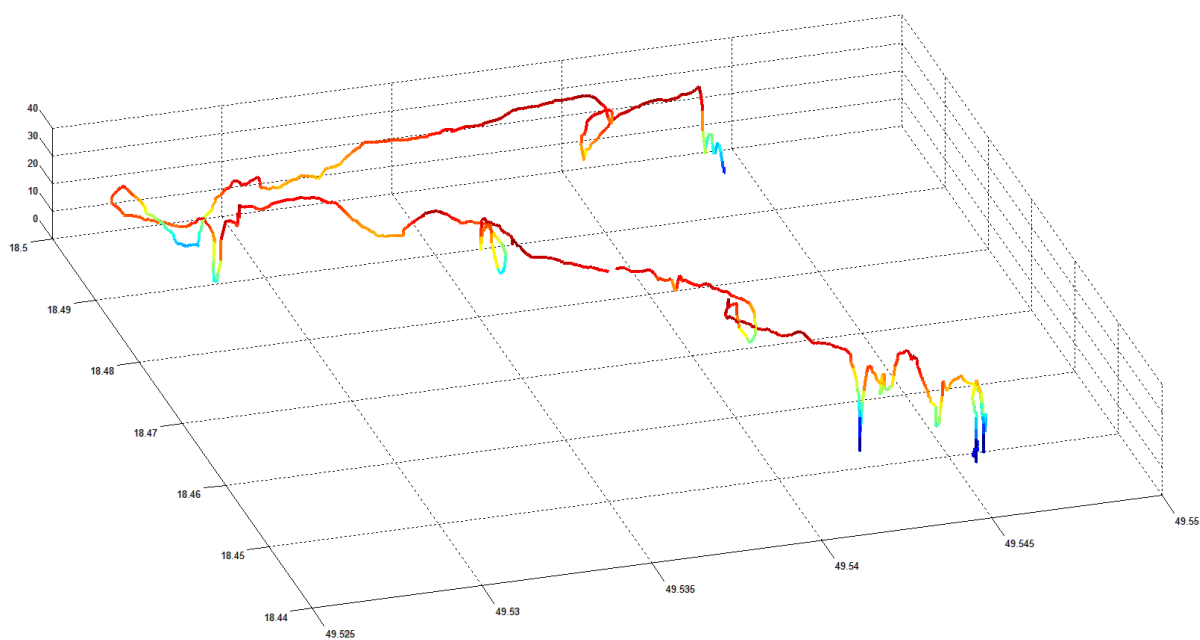
Po příjezdu na parkoviště bylo provedeno zběžné ohledání celé soustavy, zejména výkonových prvků, na tepelné přetížení. Pouze motor vykazoval známky mírného oteplení oproti okolním teplotám.

Na obrázku 27 je graf provozních veličin při sjezdu z Lysé hory. Bohužel je to jediný datový záznam, který se zachoval. Dataloger má omezenou vnitřní paměť a tedy nezvládl pojmout oba soubory. Starší záznam, tedy cestu nahoru, byl smazán. Na obrázku 25 jsou data z gps zanesena na mapový podklad.

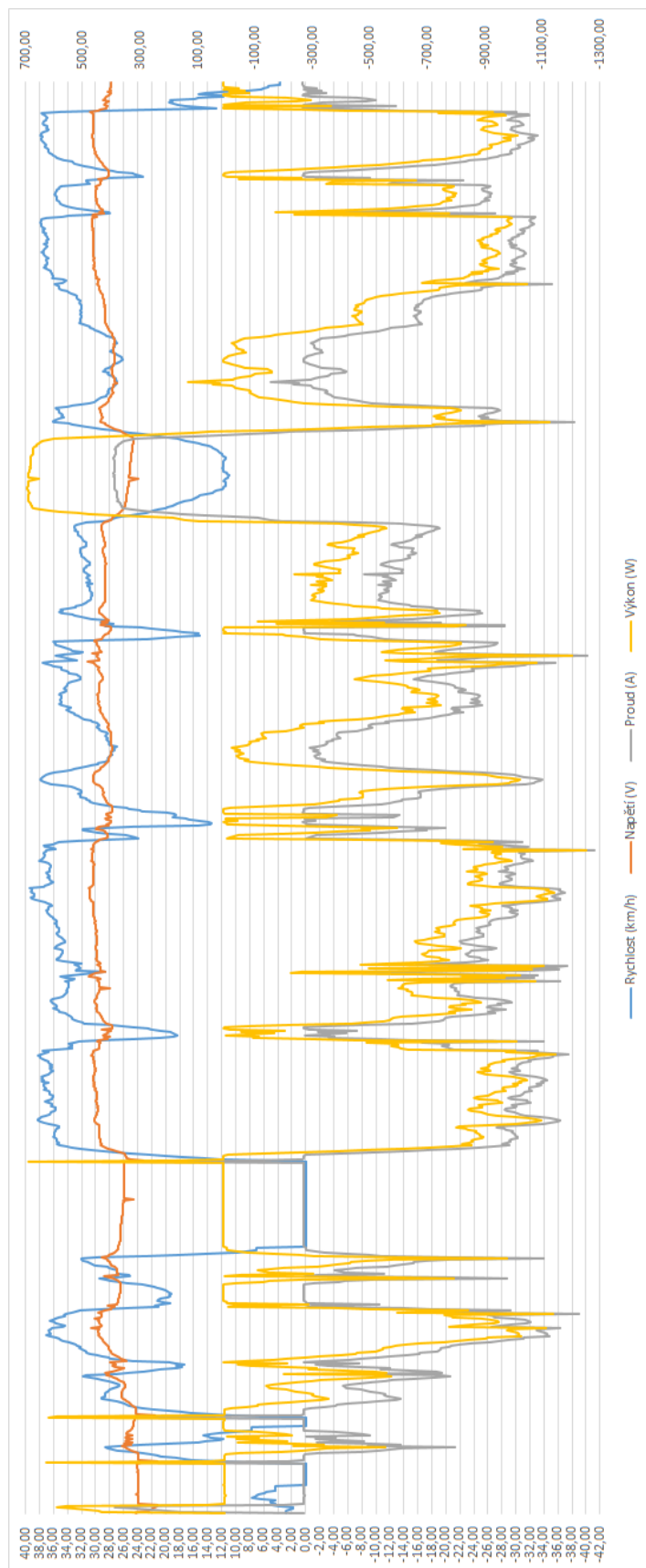
Na obrázku 26 je znázorněna 3D mapa sjezdu. Na osách x a y jsou vyneseny souřadnice severní šířky a východní délky ve stupních a na ose z a zároveň odlišená barvou je okamžitá rychlost. Teplota barev od studené modré, která znamená rychlost 0 až po rudou, která znamená rychlost maximální. Tento graf byl vytvořen ve vývojovém prostředí Matlab.



Obrázek 25: Trasa cesty z Lysé hory



Obrázek 26: Trasa cesty z Lysé hory ve 3D

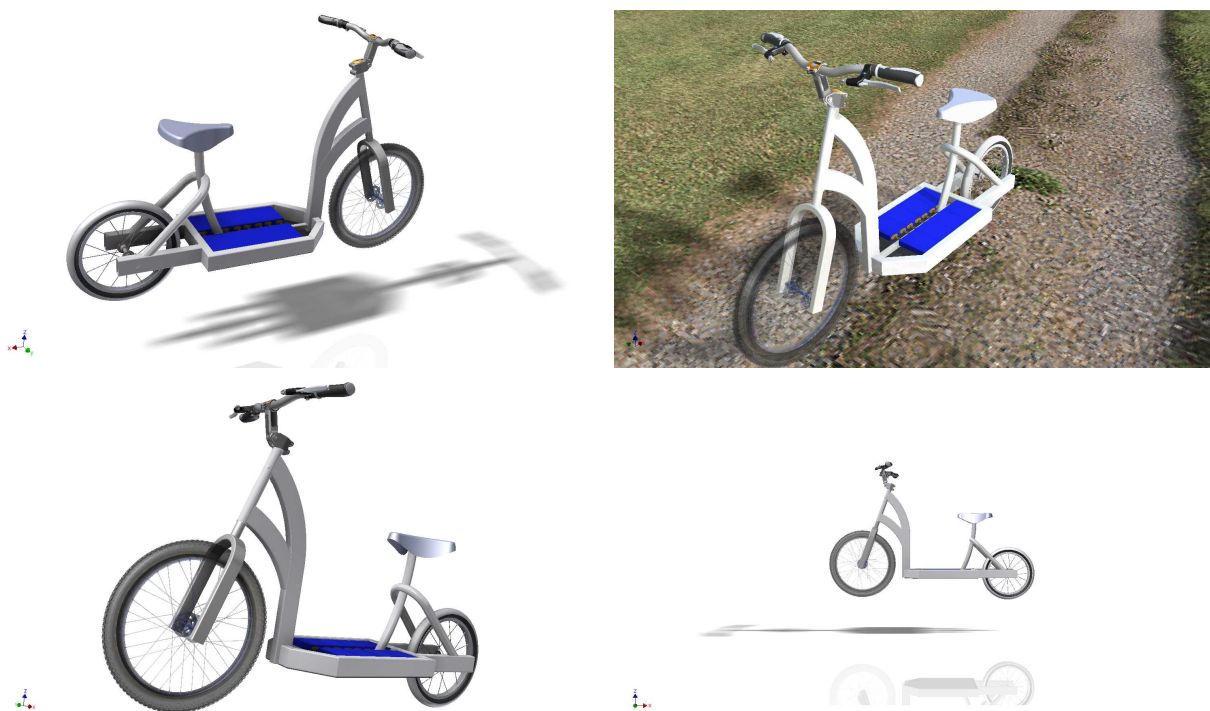


Obrázek 27: Graf průběhu provozních veličin testování v terénu

## 5.7 Provozní testy druhého prototypu s LiFePO4 články

Bylo rozhodnuto, že druhý prototyp bude optimalizován pro zjištěné parametry z předchozích zkušeností. Tato optimalizace spočívala zejména ve výrobě rámu koloběžky na míru. Koloběžka Mezeq byla dobrou volbou pro testování, nicméně bylo to stále vozídko nepřizpůsobené pro tak vysoké rychlosti, zátěž, točivý moment působící na zadní vidlici a zejména pro pouhou přítomnost elektromotoru. Tento rám nevyhovoval pro použití elektromotoru a zároveň zadní kotoučové brzdy z důvodu nedostatku místa. Nový rám koloběžky by měl realizovat výsledky úvah z kapitoly 5.2. Měl by mít dostatečnou pevnost v rychlostech do 60km/h, optimální světlou výšku pro průjezd lehkým terénem, pohodlí pro řidiče, bezpečné uložení článků i elektroniky a rovněž uložení všech vodičů a bowdenů vevnitř konstrukce.

Celou tuto mechanickou část realizoval kolega z praxe, Ing. František Bobr, který má ve své firmě k dispozici potřebné nástroje. Sladění potřeb této práce a jeho představ si vyžádalo několik nákrešů, část z nich je prezentována na obrázku 28



Obrázek 28: Výkresy druhého prototypu

Těsně před odevzdáním psané verze DP byla koloběžka vyrobena. Její první fotky jsou na obr. 29.





Obrázek 29: Fotografie druhého prototypu

## 6 Závěr

Celý proces vytváření elektrokoloběžky vyžadoval rozhodování o konstrukčních možnostech ze dvou hlavních hledisek, a to z hlediska elektrotechnického a současně strojírenského.

Řešení strojařské problematiky zahrnovalo výběr konkrétního typu rámu z dostupných komerčních produktů, výběr z možností umístění motoru a umístění baterií vzhledem k bezpečnosti a ergonomii vozidla. Řešení strojařské problematiky bylo pro tuto práci poněkud okrajovou záležitostí, nebylo však možno je obejít. Při výběru a hodnocení nabízených možností byla před optimálními ergonomickými kvalitami upřednostněna bezpečnost řidiče.

Řešení elektrotechnické problematiky spočívalo ve výběru pohonné jednotky, výběru sekundárních článků, jejich typu, kapacity a topologie zapojení. Dalším krokem bylo nastudování možnosti řízení BLDC motoru a výběr konkrétního modelu. Při zpracovávání práce byl pro realizaci všech vytvořených prototypů vybrán bezkartáčový motor umístěný v kole. Ten byl postupně osazen při testování na dva různé typy rámu, a to nejprve na komerčně dostupný typ Yedoo Mezeq, na druhém prototypu na rám vyrobený na zakázku z důvodu eliminace nedostatků projevených při testování prvního prototypu. První prototyp byl napájen trakčními bateriemi, které se neosvědčily především důvodu neschopnosti dodávat dlouhodobě vysoký výkon. Jejich další podstatnou nevýhodou byla jejich vysoká hmotnost a velikost. Z tohoto důvodu byly pro realizaci druhého prototypu zvoleny lithiové články. Ty jednak splňují požadavky na výkon pohonné soustavy a také poskytují větší variabilitu umístění na rámu díky menším rozměrům. Druhý prototyp bylo tedy možno osadit články do stupátka, aniž by toto umístění způsobilo zvýšení těžiště vozidla nad bezpečnou mez. Z hlediska bezpečnosti řidiče se projevila tato volba jako vhodnější, současně poskytla snadnější možnost pohonu svépomocí bez motoru.

Na motoru prvního prototypu byla vytvořena elektronická převodovka, což znamená přepínání fází motoru mezi konfiguracemi hvězda a trojúhelník. Touto funkcionalitou se žádné pohonné systémy pro elektromobilitu nezabývají, ačkoliv je to známý a používaný princip například u cirkulárek, dopravníků a jiných strojních zařízení. Převodovka umožňuje realizovat rozjezd na hvězdu, která poskytuje vyšší točivý moment, a při dosažení stanovené rychlosti přepnout na trojúhelník a tím zvýšit maximální rychlost a to 1.73krát. Řídicí systém má kromě samotného řízení vozidla za úkol zprostředkovávat informace o vozidle řidiči. Tak se děje pomocí vizualizace na posvíceném LCD a zpětné vazby od operátora pomocí tlačítek. Značná část dat ve vizualizaci jsou získávána z BMS, která je ve vývoji, proto jsou data zatím řešena pouze ilustračně. Prozatím jsou dostupná data o okamžité rychlosti, teplotách a celkové ujeté vzdálenosti vozidla.

Koloběžka je ve vývoji téměř dva roky, za tu dobu se na trhu toto místo zaplnilo a objevilo se několik výrobců elektrokoloběžek. Dokonce jsou používány motory od stejného výrobce, jako jsem použil já. Příkladem mohou být české koloběžky Perut, nebo polský Huler

Přínos a odlišnost méj práce vidím v použité automatické dvoustupňové převodovce, díky níž jsem dosáhl oproti ostatním koloběžkám vyšší rychlosti o více než o polovinu při stejném výkonu motoru. Další výhodou spatřuji v přehledném HMI se spoustou doplňkových funkcí a informací.

Odlišností je i použití LiFePO<sub>4</sub> článků na místo Li-ion. Technologie LiFePO<sub>4</sub> poskytuje garanci více cyklů a zcela zásadní zlepšení bezpečnosti. Teoretickými výpočty byl odhadnut dojezd s baterií s těmito články přibližně do 120 km na jedno nabití. To by byl dvojnásobek oproti komerčně dostupným elektrokoloběžkám. Skutečný dojezd bude muset být empiricky ověřen. Pokud by se potvrdila cifra 120km na jedno nabití a výrobce použitých článků deklaruje 2000 cyklů před poklesem kapacity pod 80%, znamenalo by to nájezd přes 200 000km.

Rozšíření a zlepšování této práce se budu věnovat i nadále. V plánu je implementace datalogeru, náhrady za poruchový a drahý Speedict Mercury (toho času nefunkční). To předpokládá připojení Bluetooth, SD karty a GPS modulu. Dalším prostorem pro zlepšování je bezpochyby minimalizace řady bezpečnostních rizik. Podobně jako u motorek i v rámci této práce bych rád implementoval ABS pomáhající při brždění. Další bezpečnostní funkcí by měl být akcelerometr. Ten může nejen regulovat akceleraci při rozjezdu tak, aby nedošlo ke ztrátě styku předního kola s vozovkou – aktivní bezpečnost, ale může posloužit i pro detekci pádu a provést opatření k minimalizaci škod – pasivní bezpečnost. Mezi hlavní prvky aktivní bezpečnosti dále patří dobrá světla, která budou rovněž předmětem dalšího vývoje.

Práce na druhém prototypu pokračují. V současném stavu je odstrojována koloběžka Mezeq a veškeré komponenty elektropohonu instalovány do nového rámu. Ten byl (viz výše) vyroben na míru a odpovídá přesným potřebám mé koncepce elektrokoloběžky. Proběhly první testy rámu bez pohonu, výběr komponent jako jsou brzdy, přední vidlice, sedátko atd. Ve chvíli, kdy bude BMS dokončena, bude možno naprogramovat zbytek řídicího systému a podrobit elektrokoloběžku finálním zkouškám. Mezi jedním z plánovaných testů pro potvrzení zvýšení kvalit celé soustavy je i opětovný výjezd na Lysou horu. Pokud budou testy úspěšné a elektrokoloběžka funkční, výsledky budou prezentovány při obhajobě diplomové práce.



Obrázek 30: Ilustrační foto použití koloběžky

## Literatura

- [1] EMADI, Ali. *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. 1st ed. Electrical and Computer Engineering, CRC Press, 2005. ISBN 978-0824723613.
- [2] WACH, Piotr. *Dynamics and Control of Electrical Drives*. Berlin: Springer-Verlag, 2014. ISBN 978-3642441837.
- [3] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - ATmega16*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-174-8/978-8073001742.
- [4] HORÁK, B., K. FRIEDRISCHKOVÁ, J. KAZÁRIK, J. NOWAKOVÁ a Z. SLANINA. *Elektromobilita II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3532-7. Dostupné z: [netfei.vsb.cz](http://netfei.vsb.cz)
- [5] ATMEL CORPORATION *Firemní dokumentace*. Dostupné z: [www.atmel.com](http://www.atmel.com)
- [6] KUBÁČ, Petr *Jak hýbati robotem* Publikováno 1.9.2011; Citováno dne 28.3.2016. Dostupné z: [Jak hýbati robotem](#)
- [7] David Swanson and Kurt Perski, STMicroelectronics *Designing a MCU-driven permanent magnet BLDC motor controller* Embedded; Publikováno 13.7.2008; Citováno dne 28.3.2016. Dostupné z: [Designing a MCU-driven permanent magnet BLDC motor controller](#)
- [8] *Katalog výrobce e-pohonu*; Citováno dne 28.3.2016. Dostupné z: <http://www.e-pohon.cz/e-pohon/eshop/3-1-Sety-na-prestavbu-e-bike/21-2-Sety-500-1000W-do-naboje/5/193-Konverzni-kit-MagicPie-predni-kolo-16>
- [9] Maxim Integrated Products, Inc. *APPLICATION NOTE 162 Interfacing the DS18X20/DS1822 1-Wire® Temperature Sensor in a Microcontroller Environment*; Publikováno 8.3.2002; Citováno dne 28.3.2016. Dostupné z: [www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/162r](http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/162r)
- [10] *Katalog výrobce devi motion*; Citováno dne 28.3.2016. Dostupné z: <http://www.devimotion.com/D1000583.html>
- [11] RAHN, Christopher D. a Chao-Yang WANG. *Battery Systems Engineering* 1st ed. Wiley, 2013. ISBN 978-1-119-97950-0
- [12] GOLEMBIOVSKÝ, Matěj *Balancovací systém pro elektrický motocykl* Ostrava, 3.6.2016. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava; Fakulta elektrotechniky a informatiky; Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství.
- [13] Skupina autorů U8Glib *Universal Graphics Library for 8 Bit Embedded Systems*. Citováno dne 24.4.2016 Dostupné z: <https://code.google.com/archive/p/u8glib/>



## A Seznam příloh na přiloženém CD

- Datalog
  - LysaHoraData
    - \* lysa3D.png
    - \* mapaSjezdu.jpg
    - \* pouzeSouradnice.xlsx
    - \* sjezd.xls
    - \* report.pdf
  - datalog.xlsx
- Použitý HW
  - 1-Wire
    - \* ds18b20.pdf
    - \* ow.pdf
  - Atmega
    - \* External Interupts.pdf
    - \* Možnosti 2560.pdf
    - \* RTCatmega.pdf
    - \* Timers.pdf
  - Články
    - \* 15Ah.pdf
    - \* 20Ah.pdf
  - Deska Tlačítek
    - \* buttons.brd
    - \* buttons.sch
    - \* DPSTlacitka.png
    - \* SCHTlacitka.png
  - Deska Tlačítek
    - \* codeAVR.zip
    - \* 12864LCD\_datasheet.pdf

- Programové vybavení
  - DP17
    - \* .c a .h soubory s programy
- Výroba prototypů
  - Prototyp0a1
    - \* Fotografie
  - Prototyp2
    - \* Fotografie
    - \* Modely
- kolobezkaCenik.xlsx