



## **Středoškolská technika 2017**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

### **Teorie a výroba elektrické koloběžky**

**Josef Kohák**

SPŠE Ječná

Ječná 30, 121 36, Praha 2

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

V Praze dne 17. 2. 2017 .....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval rodině za jejich podporu a Ing. Tomáši Žitnému za pomoc při řešení problémů a jeho věcné návrhy.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá popisem stavby motorizované koloběžky. Popisuje co vše je potřeba k přestavbě klasické koloběžky na elektrickou. Cílem byla schopnost dosáhnout rychlosti 30 km/h a dojet přes 20 km. Jako hlavní řídicí jednotka byla použita platforma Arduino Nano s mikrokontrolérem ATmega328P. Cíl se podařilo splnit a to v plném rozsahu.

## **Klíčová slova**

Koloběžka; stejnosměrný komutátorový motor; Li-Po baterie; mikrokontrolér; elektronika

## **Annotation**

This thesis describes the construction of motorized scooter. Also describes what is needed to rebuild the normal kick-scooter to electric. The goal was the ability to reach speeds of 30 km / h and reach distances over 20 kilometers. The main control board is an Arduino Nano with an ATmega328P microcontroller. The rebuild was successful.

## **Keywords**

Kick scooter; DC brushed motor; Li-Po batteries; microcontroller; electronics

## Obsah

1	Úvod.....	8
1.1	Přesné vymezení problému.....	8
2	Realizace – elektronická část .....	11
2.1	Baterie a nabíjení .....	11
2.1.1	Volba baterií.....	11
2.1.2	Balancování článků .....	13
2.1.3	Volba nabíječky.....	13
2.1.4	Velikost nabíjecího proudu .....	14
2.2	Motor .....	14
2.2.1	Výběr motoru – technologie.....	14
2.2.2	Výběr motoru - výkon .....	15
2.2.3	Výběr motoru – napětí.....	15
2.2.4	Zvolený motor .....	16
2.3	Regulátor .....	16
2.3.1	Výběr typu regulace .....	16
2.3.2	Výroba vlastního regulátoru.....	18
2.3.3	Vlastní regulátor – výsledek testování .....	20
2.3.4	Volba komerčního regulátoru.....	21
2.4	Kabeláž .....	22
2.5	Mikroprocesor a periferie .....	23
2.5.1	Výběr mikroprocesoru.....	23
2.5.2	Vstupní periferie.....	23
2.5.3	Výstupní periferie.....	25
2.5.4	Osvětlení.....	26
2.6	Program .....	26
3	Realizace - strojírenská část .....	27
3.1	Převod síly .....	27
3.1.1	Způsob přenosu síly .....	27
3.1.2	Volba rozteče řetězových článků .....	27
3.1.3	Převody.....	28
3.2	Přichycení motoru.....	28
3.3	Boxy a ochrana .....	30

3.4	Uchycení a umístění baterií .....	30
3.5	3D tisk.....	31
3.5.1	Návrh modelu .....	31
3.5.2	Tisk – parametry tiskárny.....	32
3.5.3	Výsledek tisku .....	32
4	Závěr.....	33
5	Diskuze.....	35

## Seznam obrázků

Obr. 1:	Blokové schéma systému .....	8
Obr. 2:	Použité baterie - Turnigy 5 Ah, 4S, Hardcase .....	12
Obr. 3:	Podobná baterie - Turnigy 5 Ah, 4S, Softcase [1] .....	12
Obr. 4:	Použitý motor, zkušebně namontovaný v jeho budoucí pozici.....	16
Obr. 5:	Princip a funkce PWM [2] .....	17
Obr. 6:	Tranzistory přichycené na chladičích .....	19
Obr. 7:	Ochrany MOSFETu, zobrazené ve schématu .....	20
Obr. 8:	Napěťové špičky tvořené motorem, zobrazené na osciloskopu.....	21
Obr. 9:	Zakoupený PWM regulátor.....	22
Obr. 10:	Řídící deska s vývojovou deskou Arduino .....	23
Obr. 11:	Plynová páčka před úpravou .....	24
Obr. 12:	Upravená plynová páčka (dvě přidaná tlačítka).....	24
Obr. 13:	Vestavěný displej a údaje na něm se zobrazující .....	25
Obr. 14:	Osvětlení na koloběžce během noci.....	26
Obr. 15:	Porovnání řetězů #35 (dole) a #25 (nahore) [3].....	28
Obr. 16:	Přichycený motor, již s napnutým řetězem.....	29
Obr. 17:	Plech s drážkami, zde během lakování .....	29
Obr. 18:	Umístění a uchycení baterií v rámu koloběžky.....	31
Obr. 19:	Ukázka z programu Slic3r – rozřezání modelu krytu regulátoru.....	32
Obr. 20:	Výsledný produkt - kryt regulátoru.....	33
Obr. 21:	Pohled na hotovou elektrokoloběžku.....	34

## Seznam použitých zkratk

**A/D** – Analog to Digital; Analogově digitální převodník

**AWG** – American Wire Gauge; Americký systém značení tloušťky kabelu

**BLDC** – Brush Less Direct Current; Bezkomutátorový Stejnoseměrný Proud

**D/A** – Digital to Analog; Digitálně analogový převodník

**DC** – Direct Current; Stejnoseměrný proud

**ESC** – Electronic Speed Controller; Elektronický Regulátor Rychlosti

**LCD** – Liquid Crystal Display; Displej z Tekutých Krystalů

**MOSFET** – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor; Polem Řízený Tranzistor  
**PCB** – Printed Circuit Board; Deska Plošného Spoje  
**PWM** – Pulse Width Modulation; Pulsně Šířková Modulace

## Předmluva

Toto téma jsem si vybral, jelikož jsem již od mala chtěl mít své vlastní elektrokolo, v té době se jejich prodej v České republice teprve rozjížděl a tak nešlo o žádnou častou a dostupnou věc. Tehdy jsem narazil na nedostatek financí, ale taktéž se jednalo o neprobádané vody, tudíž jsem neměl dostatek sebedůvěry pustit se takového projektu. Dnes jsou naopak elektrokola velmi častá a existuje spousta výborných návodů, jak při vlastní konstrukci takového kola postupovat. Proto jsem se rozhodl probádat příbuznou oblast – elektro koloběžky. Ty se u nás i ve světě teprve probouzejí a tak věřím, že by někomu moje zkušenosti mohly přijít vhod.

Toto téma práce je zajímavé pro každého, kdo by si rád svojí elektro koloběžku postavil, či ho alespoň tento postup zajímal. Sám jsem získal mnoho zkušeností, které mohu předat, a tím pomoci dotyčným. Ušetřit jim jak materiální, tak i časové prostředky. Nejvíce z těchto zkušeností se týká konstrukcí elektronických systémů, regulátorů a výkonového řízení motoru.

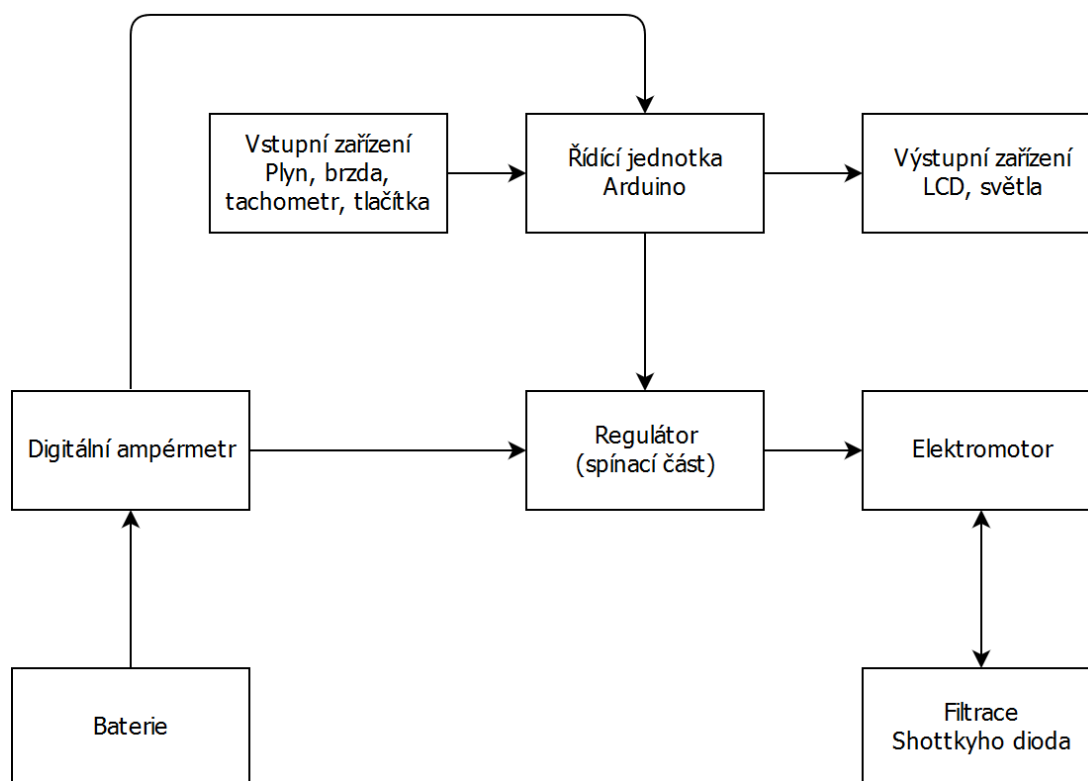
Elektrokoloběžky obecně mají mnoho výhod oproti konvenčním koloběžkám či srovnatelným elektrokolům. Oproti nemotorizovaným koloběžkám výrazně zvyšují komfort jízdy, cestovní rychlost, stejně tak i dojezd. Díky výraznému osvětlení je zvýšena i bezpečnost na silničních komunikacích. Rozměry se přitom výrazněji neliší. Za jedinou, velkou nevýhodu může být považována hmotnost. Ta se v mém případě zdvojnásobila. (Z původních 7 kg na 15 kg). Naopak oproti elektrokolům, a to i skládacím, nabízí vyšší manévrovatelnost, kompaktnost do městské hromadné dopravy a možnost cestovat i po komunikacích určených pro chodce.

Cílem práce je přestavět klasickou, obyčejnou koloběžku na elektricky poháněnou. Mezi hlavní priority patří nízká hmotnost, vysoká rychlost - alespoň 30 km/h, dojezd nejméně 20 km a rychlé nabíjení do 2 hodin. Měla by být bezpečná, vybavená brzdovým světlem, i předním osvětlením pro jízdu v noci a šeru. Bylo by rovněž vhodné vidět na displeji momentální rychlost, spotřebu, ujetou vzdálenost a zvolený jízdní mód. Ty by měly být nejméně dva. První pro normální, svižnou jízdu a druhý „Eco“ pro ekonomickou a plynulou jízdu. Zde je cílem co nejdélší ujetá vzdálenost. Řídící jednotka musí být schopna rozeznat vybité baterie a včasným odpojením motoru zabránit jejich hlubokému vybití. Všechny tyto požadavky musí být splněny a to tak, aby celková částka za takovouto motorizaci nepřesáhla 10 000 Kč.

# 1 ÚVOD

## 1.1 Přesné vymezení problému

Přestavba koloběžky není jednoduchý úkol, a musí se důkladně promyslet mnoho záležitostí. Například pohon, zde je třeba rozhodnout, zda pohánět přední či zadní kolo. Poté jaký typ elektromotoru použít (DC kartáčový nebo BLDC) a jak z něj přenést moment na hnané kolo. Ten se nejčastěji přenesení řetězem, řemenem nebo třením. Každé řešení má své výhody i nevýhody. Dalším důležitým rozhodnutím je volba baterií. Existuje mnoho chemických typů a každá baterie má svá specifika. Po výběru je třeba rozhodnout o umístění. Zde se musí myslet na bezpečnost baterií, umístění těžiště koloběžky, eliminaci vibrací a další faktory.



Obr. 1: Blokové schéma systému

Nyní popíši prvky, uvedené v blokovém schématu (Obr. 1). Při volbě řídicí jednotky se lze spolehnout na vlastní řešení, či komerčně prodávané. U komerčního výrobku není vždy možno plně kontrolovat dění vnitřních procesů (například vypnout funkci soft-startu a podobně), ovšem na druhou stranu je zde větší jistota, že výrobek bude spolehlivě pracovat a bude dobře dimenzován. Při konstrukci vlastního řešení je třeba vzít v potaz mnoho faktorů. Jednou z hlavních nutností je dostatečná proudová dimenzovanost. Na proudy 100 A již nestačí obyčejně široká PCB cesta s tloušťkou mědi 35  $\mu\text{m}$ . Je třeba proudově posílit cesty - nejčastěji pocínováním. Další klíčový prvek je spínací část. Unipolární tranzistory je třeba vybrat zvlášť obezřetně. Limitačním parametrem často bývá jejich maximální napětí drain-source. To se může u některých MOSFETů pohybovat velmi nízko, například i méně než 50 V. Takovéto napětí jde bez dostatečného odfiltrování špiček od motoru jednoduše



překročit. Tím se ovšem MOSFET může poškodit. Proto je potlačení špiček řešeno použitím diod, přesněji diod typu Shottky. Ty jsou rychlejší oproti konvenčním polovodičovým diodám. Díky tomu lépe pohlcují překmitý a chrání tranzistory. Jejich nevýhodou je jen menší závěrné napětí, jež dokáží blokovat.

Další částí řídicí jednotky je mikrokontrolér či mikropočítač. Vhodnější volbou je jistě mikrokontrolér, jelikož výkonové nároky nejsou nijak kritické a pro jednoduché zobrazování na LCD zobrazovači postačí běžný, levný mikrokontrolér. Pokud by někdo přece jen požadoval např. barevnou obrazovku o rozlišeních vyšších než 320x240 bodů a chtěl mít součástí projektu třeba živý streaming videa, doporučil bych zejména Raspberry Pi a jeho alternativy. Zejména Raspberry Pi Zero je vhodné pro své malé rozměry a nízkou cenu. Ovšem mikropočítač nebude zřejmě nejčastější volbou. Daleko větší předpoklady má například vývojová deska Arduino, vybavená mikrokontrolérem ATmega328P, či obdobná deska s procesorem STM32. Takováto destička má velké předpoklady díky množství levného příslušenství a svým jednoduchým programováním. Není tak problém dodatečně připojit další čidla jako gyroskopy, akcelerometry, teploměry a vlhkoměry.

Tím lze považovat vyřešení hlavních problémů za hotové. Ještě však zbývá mnoho dalších, menších problémů, které mohou celý projekt vylepšit, nebo také značně poškodit (například nepoužití nadproudové ochrany). Začneme tedy výčtem ochran. První a nejdůležitější je jistě podpěťová ochrana. Podle typu akumulátoru musíme zjistit, jakou může hrát roli hluboké vybití baterií. Zvláště u některých typů akumulátorů, zejména u lithiových je takováto ochrana nutností. Již jedním hlubokým vybitím se může baterie nenávratně poničit. Tím se jí nejen sníží kapacita, ale i drasticky sníží životnost. Naopak při použití olověných či nikl-kadmiových akumulátorů nehraje takováto ochrana tak významnou roli. Druhou, velmi důležitou ochranou je ochrana nadproudová. Ta dokáže zabránit regulátoru zvyšovat proud a případně i vypnout celý systém. Pro některé součástky jako tranzistory, motor nebo i kabeláž může být nadproud fatální. U motoru se jeho nominální maximální proud může krátkodobě překročit (např. při rozjezdu), ovšem motor nemůže být trvale ve špičce provozován (vyjetí delšího kopce). Tehdy by se začal dramaticky zahřívat a tím by došlo ke snížení životnosti vinutí, v extrémním případě i k jeho spálení. Zato u tranzistorů může být na škodu i malý nadproud. Nikdy by se neměl překročit maximální povolený proud, byť by se jednalo jen o okamžik. Tranzistory jsou testovány a dimenzovány pouze na špičky trvajících řádově pár milisekund! U teploty můžeme zůstat – je záhodno investovat do termistoru a kontrolovat s ním teplotu motoru, teplotu výkonových prvků, případně i dalších aktivních prvků jako jsou třeba step-down měniče.

Tím lze považovat základní zabezpečení a řízení za hotová. Proto se podívejme na pasivní bezpečnostní prvky. Samotná bezpečnost jezdce je doplněna o aktivní přední osvětlení. To je možné aktivovat buď ručně, nebo automaticky pomocí fotorezistoru, pokud je detekována tma. Zadní, brzdové světlo je aktivováno při brzdění. Tím se výrazně zvýší viditelnost koloběžky a ostatní účastníci silničního provozu tak mohou lépe reagovat na nečekané situace. Dalším pasivním prvkem je dobře nastavená výška řídítek. Jezdec by je měl mít minimálně v takové výšce, aby mu to jednak bylo pohodlné, avšak neměl by mít příliš

shrbená záda. To by, spolu s faktem, že se stojí jen na jedné noze, mohlo vést při delších jízdách k bolestem a křečím. Je třeba zvážit i bezpečnost samotného hnaného systému. V případě motoru ve výpletu kola není co řešit, avšak při pohonu pomocí řetězu či řemenu může být vhodnější točící se řetěz, nejlépe i kolo zakrýt bezpečnostním krytem. Stejně tak mít vedle ozubeného kolečka, připojeného na osu hnaného kola nějaký prostor, pro případ že by řetěz sklouzl. Tím se dá zabránit nebezpečnému tzv. „kousnutí“ (zaseknutí řetězu a tím pádem i zablokování kola) a následné neovladatelnosti koloběžky. Rám by neměl být namáhán větší zátěží, než pro kterou je určen. V mém případě je maximální hmotnost jezdce určena výrobcem na 100 kg.

Po zvážení těchto záležitostí můžeme započít se stavbou samotnou.

## 2 REALIZACE – ELEKTRONICKÁ ČÁST

### 2.1 Baterie a nabíjení

#### 2.1.1 Volba baterií

##### 2.1.1.1 Technologie

Baterie jsou většinou nejtěžším a nejdražším článkem takovéto stavby. Velmi proto záleží na technologii, pro kterou se rozhodneme. Rozlišujeme tyto nejčastější typy:

- Li-Ion (Lithium-Iont) – velmi častá volba při podobných projektech, jako jsou například elektrokola. Výhodou je nižší cena než Li-Pol baterie, vyšší bezpečnost než Li-Pol, nízká hmotnost a velká rozšířenost například v notebookových bateriích a elektroautech – typ článku 18650.

- Li-Pol (Lithium-Polymer) – mnou zvolená technologie, má nejvyšší hustotu kapacity na objem, nejnižší hmotnost, vysoký výkon, podporuje rychlé nabíjení a má mnoho nabíjecích cyklů. Nevýhodou je vysoká cena a nebezpečnost – při špatném zacházení hrozí výbuch a požár.

- Li-FePO<sub>4</sub> (Lithium-Železo-Fosfát) – technologie srovnatelná s Li-Ion, je ovšem velmi bezpečná, na rozdíl od Li-Pol nemůže explodovat či se extrémně zahřát. Také má nejvíce nabíjecích cyklů z těchto uvedených typů. Nevýhodou je ještě vyšší cena než Li-Pol.

- Pb (Olovo) – Olověný bezúdržbový akumulátor je jasnou volbou pokud máme velmi omezený rozpočet. Tyto baterie poskytují určitý výkon a to za velmi nízkou pořizovací cenu. Jejich velkou nevýhodou je ovšem velice vysoká hmotnost. Battery pack, složený z Pb baterií, by měl hmotnost cca 15 kg, zatímco Li-Pol má při stejné kapacitě cca 2 kg.

- NiMH (Nikl-Metal-Hydrid) – NiMH je starším typem, dnes hojně využívaný v nabíjecích akumulátorech velikosti tužkových baterií – AA a AAA. Výhodou je nízká cena a solidní hustota energie, nevýhodou malé napětí, pomalé nabíjení a vyšší hmotnost.

- NiCd (Nikl-Kadmium) – Tyto akumulátory jsou dnes na ústupu. Jedná se o velmi starou technologii, jejíž výhodou je snad jen necitlivost akumulátoru – velmi vysoký rozsah teplotního použití a možnost vybití akumulátor do plného vybití bez trvalého poškození (hlubokým vybitím se akumulátory založené na lithiu velmi poškozují). Nevýhodou je velká hmotnost, rychlost nabíjení a hlavně paměťový efekt – baterie se musí pokaždé plně nabít a vybit, aby neztrácely kapacitu.

##### 2.1.1.2 Bezpečnost

Akumulátory jsou prvkem obsahujícím veškerou energii v koloběžce. Při nesprávném zacházení či mechanickém poškození mohou tuto energii, v krajním případě, uvolnit vysokou teplotou či dokonce výbuchem! Proto akumulátory chráníme před mechanickým poškozením. Zvláště citlivé jsou baterie typu Li-Pol. Ty jsou většinou tvořeny z měkkých, snadno propíchnutelných váčků. Často bývají překryty pouze fólií či plastovým přebalem. Takto nechráněným akumulátorům se říká „Softcase“, tedy volně přeloženo jako měkký obal –

žádná ochrana (Obr. 3). Naštěstí existují i obrněné verze takovýchto baterií. Jsou známy jako „Hardcase“ (tvrdý obal) a jsou tvořeny z tvrdé, plastové skořepiny o tloušťce minimálně 1mm, ve které je umístěn akumulátor (Obr. 2). Takováto ochrana je velmi efektivní. Obal se neprohne, nepromáčkne, chrání před úderem předmětů a špínou. Nevýhodami je pouze vyšší hmotnost, větší pořizovací cena a menší výběr v dostupných typech.



Obr. 2: Použité baterie - Turnigy 5 Ah, 4S, Hardcase



Obr. 3: Podobná baterie - Turnigy 5 Ah, 4S, Softcase [1]

Na obrázcích výše (č. 2 a č. 3) lze vidět porovnání totožných baterií, od stejného výrobce, jednou ovšem v tvrdém pouzdru a podruhé pouze obalené plastem.

### **2.1.1.3 Vybíjecí proud**

U modelářských baterií se maximální vybíjecí proud značí v kapacitách baterie (více v kapitole 2.1.4) což zkráceně znamená, že 1 Ah baterie s vybíjecím proudem 50 C dokáže poskytovat 50 A, bez poškození a přehřátí.

Mnou zvolené baterie mají vybíjecí proud „jen“ 25 C, avšak jelikož jsou dvě, paralelně zapojené, tento vybíjecí proud se také zdvojnásobí na 50C. Takovýto výkon při kapacitě battery packu 10 Ah nám dává vybíjecí proud 500 A. To je více než dost energie. Vynásobením 500 A a napětí 30 V dostaneme hodnotu příkonu, jež dokáží tyto baterie poskytovat. Jedná o číslo 15000 W. Proto máme při použití 500W motoru opravdu velkou rezervu.

V tomto parametru můžeme na bateriích finančně ušetřit a pořídit nejlevnější možnost, s nejnižším vybíjecím proudem. Není třeba připlácet si za možnosti s vyššími vybíjecími proudy jako 50C nebo dokonce 80C.

### **2.1.1.4 Napětí - počet článků v sérii**

Jelikož má jeden článek Li-Pol (nebo Li-Ion) baterie pouhých 3,7 V, přistupujeme k řazení těchto článků do série. Počet těchto článků v jednom akumulátoru označujeme číslovkou a za ní jdoucím písmenem “S“. V praxi tak například čtyř-článekový akumulátor označujeme jako 4S s napětím 14,8 V (4 x 3,7V).

V konstruované koloběžce je použit 8S battery pack s nominálním napětím 29,6 V. Toto napětí jsem zvolil pro jeho výhodnost při použití s 24V motorem.

## **2.1.2 Balancování článků**

Pro zajištění dobrého zdraví baterie složené z více než jednoho lithiového článku v sérii je třeba použít tzv. balancování. Jedná o proces, při kterém se zajistí, že každý z článků baterie má stejné napětí jako články sousední. Zabrání se tak situaci kdy by jeden článek měl např. 4 V a článek sousední pouze 3,8 V. Takováto situace by po připojení na zátěž vedla k nerovnoměrnému vybíjení baterie jako celku a mohla vést k trvalému poškození baterie.

## **2.1.3 Volba nabíječky**

Jako nabíječku je třeba zvolit kompromis mezi přenosností a nabíjecím výkonem. Já pro mé účely použil komerční, modelářskou nabíječku s maximálním trvalým nabíjecím výkonem 150 W. Jiná řešení s větším výkonem by byla podstatněji dražší. Baterie použitá v koloběžce má kapacitu zhruba 300 Wh. Můžeme tedy velmi zhruba aproximovat, že nabíjecí doba se bude pohybovat okolo 2 hodin. Omezujícím faktorem u modelářských nabíječek je také maximální počet článků v sérii. Ty běžné dokáží obsloužit 6 článků. To může být limitem pro stavbu vozidla s baterií o vyšším napětí.

Další záležitostí jsou také rozměry a hmotnost nabíječky. Není proto vhodné u mobilní nabíjecí stanice žádat vždy největší možný výkon. Mou prioritou byla mobilita. Většina modelářských nabíječek požaduje na vstupu napětí 12 nebo 24 V. Za předpokladu nabíjení výkonem 300 W potřebujeme síťový zdroj s výstupním výkonem minimálně 350 W (Nabíječka nemá při převodu napětí 100% účinnost, proto počítáme s rezervou a volíme silnější zdroj, než je zdánlivě potřeba).

Samozřejmě se také vyrábějí řešení plně integrovaná, tedy síťový zdroj a nabíječka v jednom balení, ovšem tím se nám výběr vhodného, cenově dostupného řešení, opět ztíží.

#### **2.1.4 Velikost nabíjecího proudu**

U baterií typu Li-Pol či Li-Ion platí nepsané pravidlo o nabíjení 1C, tedy jednou kapacitou. To znamená, že baterii o kapacitě 1000 mAh budeme nabíjet proudem 1000 mA po dobu jedné hodiny. Taková rychlost nabíjení je zcela bezpečná a obecně doporučována. Nabíjet menším proudem není samozřejmě problém. Naopak platí, že čím menší proud, tím déle zvládne akumulátor sloužit a s tím souvisí i větší počet cyklů, které může vykonat. Baterie v mém zařízení jsou dobíjeny 0,5C. Tedy 10 Ah akumulátor je dobíjen proudem 5 A zhruba 2 hodiny.

Většinou ale vyžadujeme naopak kratší čas dobíjení. Tomu je úměrný dobíjecí proud. Zvolíme-li dvojnásobný proud, dostaneme se k plnému stavu rychleji. Nejedná se o naprosto přesnou přímou úměru, ale přibližujeme se k ní. Nabíjení 2C tedy bude trvat cca 35 minut. Při dvojnásobném zvýšení na 4C můžeme počítat s asi 20 minutami.

Při takovémto chování musíme být velmi opatrní. Velmi se zde zvyšují rizika přehřátí, vybuchnutí a nafouknutí. Velikost nabíjení 2C je u moderních Li-Pol akumulátorů stále považována za bezpečnou. Rychlejší nabíjení než 2,5C může být nebezpečné a je u nich velmi vhodné monitorovat článek, nejlépe být u něj pro případ poruchy či hůře požáru. Ale za dobrých podmínek lze bezpečně nabíjet články proudy 4C.

## **2.2 Motor**

### **2.2.1 Výběr motoru – technologie**

První rozhodnutí ohledně motoru je zcela určitě ohledně technologie. Rozlišujeme 2 hlavní technologie, které lze uvažovat. Jedná se o motory stejnosměrné kartáčové (DC) a stejnosměrné bezkartáčové (BLDC). Každá z těchto technologií má své výhody a nevýhody.

#### **2.2.1.1 Kartáčové DC (Direct Current)**

Kartáčový motor je nejjednodušším typem. K přenosu energie na rotor používá tzv. „kartáče“. Ty jsou nejčastěji realizovány pomocí uhlíků. Uhlíky jsou přitlačovány k rotoru pružinami a

tím vytvářejí dobrý kontakt. Nevýhodou je obrušování kartáčů a tepelné ztráty při tomto přenosu vznikající. Kvůli těmto procesům se DC motory považují za méně účinné než BLCD alternativy.

Velkou výhodou je jednoduchost ovládní, snadná změna směru rotace a nízká cena. Pro tyto benefity jsem si zvolil motor této technologie.

### **2.2.1.2 Bezkartáčové BLDC (Brush Less Direct Current)**

Novějším a v lecčem lepším typem je bezkartáčový (bezkomutátorový) stejnosměrný motor. Často bývá nesprávně označován jako střídavý. Je efektivnější, dosahuje vyšších výkonů, vyvine vyšší otáčky a přitom je výrazně menší a lehčí konstrukce. Přenos energie je realizován čistě magneticky.

Jeho hlavní nevýhodou je nutnost použití speciálního regulátoru – bývá označována zkratkou ESC (Electronic Speed Controller). Takovýto regulátor musí mít integrovanou celkem chytrou vnitřní logiku a je tak dalším drahým prvkem. Ale i přes to, že jsou BLDC motory dražší, jsou vhodné na stavbu elektrické koloběžky. Zvláště pokud chceme motor integrovat do výpletu kola.

## **2.2.2 Výběr motoru - výkon**

Motor je bez diskuze jednou z nejdražších a nejdůležitějších součástí stavby. I při špatném zpřevodování dokáže silný motor dobře fungovat. Nejdůležitějším parametrem je rozhodně výkon. Ten bývá udáván ve wattech a rozhoduje o síle a zrychlení, kterého bude možné dosáhnout. Za základní výkon pro pohon lze považovat 200 – 250 W. Takový výkon dokáže při převodu na nízkou rychlost a vysoký točivý moment pracovat spolehlivě. Výhodnější velikostí výkonu je pak motor v rozmezí 400 – 600 W. Zde lze počítat jak se svižnou rychlostí cestování, tak i s velkou silou. Opravdu velký moment a sílu mají elektromotory s výkony blízkými se 1 kW, nebo jej i přesahující. Zde můžeme čekat velké zrychlení a rychlost bezpečně použitelnou na silniční vozovce, vedle jedoucích aut.

S rostoucím výkonem motoru roste jeho průřez vinutí a jeho velikost celkově. Od toho se odvíjí rostoucí hmotnost. Proto volíme vhodný kompromis mezi výkonem a hmotností.

Já se rozhodl pro motor s nominálním výkonem 500 W. Takový motor váží zhruba 2,5 kg a přitom poskytuje dostatek pohonné síly.

## **2.2.3 Výběr motoru – napětí**

Když už se rozhodneme pro určitý výkon, musíme zvážit, zda je vhodnější jít cestou zvyšování proudu, či zvednout napětí. U vysokých proudů (> 50 A) bývá problém dimenzovat regulátory, tranzistory a kabeláž. Naopak u vysokých napětí (> 100 V) se stává napětí příliš



nebezpečné a je problém s bateriemi, bezpečností a někdy opět tranzistory. Proto se nejčastěji používají napětí 12 V a 24 V pro nízkoenergetické projekty (cca do 500 W), napětí 36 – 48 V pro středně velké výkony (500 – 1500 W) a napětí vyšší pro opravdu vysoké výkony přes 2 kW.

Já zvolil motor s nominálním napětím 24 V. Pro zvýšení výkonu jej, ovšem provozuji na 28 – 33,6 V. Díky tomu lze bezpečně (bez nebezpečného přehřívání a příliš velkého zkrácení životnosti vinutí) dosáhnout špičkově vyššího výkonu. Špičky využijeme při rozjezdu či krátkém kopci. Další výhodou použití vyššího napětí, než je nominální je, že při slábnoucí baterii nebude motor zpomalovat a ztrácet sílu. I v nejvybitějším stavu má baterie stále 24 V, tedy využíváme 100 % potenciálu až do úplného konce.

## 2.2.4 Zvolený motor

Zvoleným motorem je výrobek označený kódem XYD-6B2 (Obr. 4). Jeho jmenovité otáčky jsou 2600 RPM. Výkon má 500 W a po převodování produkuje 6,08 Nm točivého momentu. Jelikož není buzen 24 V ale vyšším napětím, dokáže krátkodobě produkovat sílu větší. Jedná se zhruba o 800 W při točivém momentu 9,73 Nm. V takovéto špičce tedy poskytuje více než 1 koňskou sílu.



Obr. 4: Použitý motor, zkušebně namontovaný v jeho budoucí pozici

## 2.3 Regulátor

### 2.3.1 Výběr typu regulace

U regulátoru si prvně rozhodneme typ regulace. Máme na výběr hned několik typů. Od velmi jednoduchých, jako je relé, po komplexní systémy regulující napětí.



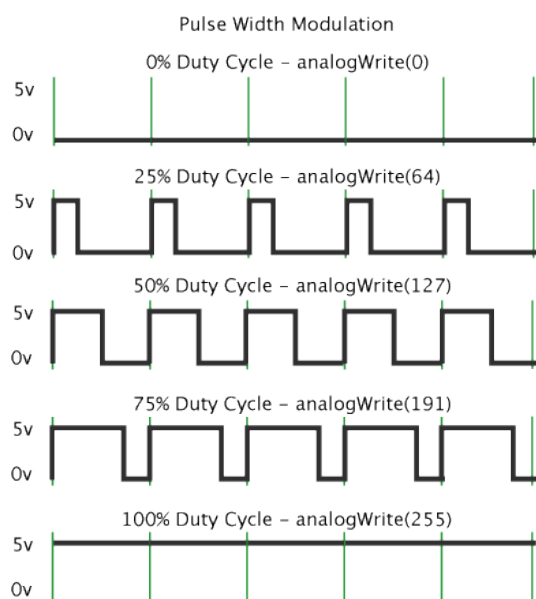
### 2.3.1.1 Použití relé

Nejjednodušší a nejlevnější regulací je použití relé (či jiného výkonového spínacího prvku), umožňuje základní ovládání motoru v stavech vypnuto (0 % výkonu) a zapnuto (100 % výkonu). Toto nemusí být velmi vhodné v okamžiku, kdy chceme regulovat rychlost citlivěji (nejezdit stále na plno) či šetřit baterii. Je zde sice možnost relé rychle spínat a rozpínat, avšak kvůli jeho fyzickým limitacím nelze spínat frekvencí větší než několik Hertzů<sup>1</sup>. Pohyb při jiném než trvalém sepnutí by byl velmi trhaný a nepříjemný.

### 2.3.1.2 PWM regulace

Velmi oblíbenou a rozšířenou regulací je pulzně šířková modulace (anglicky Pulse Width Modulation – zkráceně PWM). Princip spočívá ve velmi rychlém spínání tranzistoru (nejčastěji kvalitního MOSFETu, Obr. 5). Velkou výhodou této regulace je zachování stejné síly motoru. Regulujeme pouze rychlost otáčení. Velikost střídý na vstupu MOSFETu určí, po jak dlouhou dobu bude sepnut. Tím přímo ovlivňujeme, jak mnoho výkonu se do motoru přenese.

Frekvence spínání je vysoká, většinou větší než 10 kHz. Proto je tato regulace charakteristická svým vysokým pískotem, slyšitelným zvláště v nízkých otáčkách. PWM spojuje jednoduchost zapojení s velmi profesionálním výsledkem. Pro tyto důvody jsem tuto regulaci implementoval i já.



Obr. 5: Princip a funkce PWM [2]

### 2.3.1.3 Řízení napětím

Alternativou k PWM je složitá, ale výhodná regulace napětí. Jelikož se jedná o čistou napěťovou regulaci, neslyšíme z motoru žádné nechtěné zvuky a negenerujeme rušení na

<sup>1</sup> Jelikož musí relé, při každém sepnutí přitáhnout kontakt, a při rozepnutí kontakt odepnout působením pružiny, akce trvá značně delší dobu, než u polovodičových prvků, jakými jsou tranzistory. Proto není relé vhodným kandidátem pro aplikace, vyžadující rychlé spínání a rozpínání prvku.

širokém pásmu. Otáčky můžeme stále plynule zvyšovat a tím regulovat výkon. Nevýhodou je složitá ovládací elektronika a zapojení.

## 2.3.2 Výroba vlastního regulátoru

### 2.3.2.1 Unipolární tranzistory

Na volbě unipolárního tranzistoru neboli MOSFETu závisí parametry celého regulátoru a je nutno je vybírat velmi pečlivě. Nejvíce nás zajímají parametry:

- Max  $I_D$ , tedy maximální proud tranzistorem = maximální proud, jež dokážeme bezpečně spínat.
- Vnitřní odpor  $R_{DS(on)}$  neboli odpor v sepnutém stavu. Požadujeme jej co nejmenší, jelikož čím menší tento odpor je, tím menší bude výkonová ztráta na tranzistoru a tím menší chladič bude stačit.
- Budicí napětí na gate  $V_{GS}$ . Zde jsem měl na výběr z dvou základních typů. Rozlišil jsem je na konvenční MOSFET, tedy takový, který k plnému otevření vyžaduje okolo 10 – 12 V na gate, a druhý, tzv. Logic-level MOSFET, kterému stačí k plnému otevření pouhých 5 V na gate. Příkladem konvenčního může být například MOSFET IRF540N, zatímco Logic-level je například mnou použitý IRLI2910.
- Napětí, při kterém dojde k průrazu tranzistoru, mezi vývody drain a source. Toto napětí, nesmíme nikdy, ani špičkově, překročit! Ideálně provozujeme tranzistor do cca 80 % tohoto napětí. Označuje se  $V_{DSS}$  a může se pohybovat v rozmezí jednotek voltů až po stovky voltů.

Mnou zvolené tranzistory IRLI2910 mají dobré parametry ve všech výše uvedených parametrech. Maximální proud  $I_D$  je 31 A, je tedy při použití dvou takovýchto tranzistorů v paralelním zapojení zcela dostatečný. Vnitřní odpor  $R_{DS(on)}$  je velmi malý, pouhých 26 m $\Omega$ . Jedná se o typ Logic-level, je tedy možné budit ho přímo z výstupu Arduina<sup>2</sup>. Nejvyšší dovolené napětí  $V_{DSS} = 100$  V je pro mé účely zcela dostatečné. Baterie mají maximálně 33 V, proto zbývá dostatečná tolerance pro nebezpečné překmity a jiné.

### 2.3.2.2 Shottkyho diody

Jelikož je elektromotor induktivní zátěž, vznikají při jeho buzení přes PWM velké napěťové špičky. Tyto špičky jsou pro výkonové tranzistory velmi nebezpečné. Velmi jednoduše dokáží přesáhnout dovolení  $U_{DS}$  MOSFETu a trvale ho tím poškodit, nejčastěji nevratným průrazem. Proto používáme diody (nejčastěji typu Shottky – pro jejich velkou rychlost), připojené antiparalelně k motorové zátěži. V kladných překmitech se otevřou a „zkratují“ elektromotor. Potlačí tak špičky a unipolární tranzistory zůstanou v bezpečí.

V mém regulátoru jsem nejprve používal diodu SR504 v kulatém, axiálním pouzdru. Její maximální trvalý proud je 5 A a po krátkou dobu 8,3 ms smí špičkový proud dosahovat dokonce 120 A.

---

<sup>2</sup> Problémem zde může být spíše proudové omezení Arduina. Maximálních 20 mA (respektive 40 mA špičkově) nemusí být dostatečně tvrdé buzení – proto je třeba zvážit použití bipolárního, posilovacího tranzistoru, například BC547A.

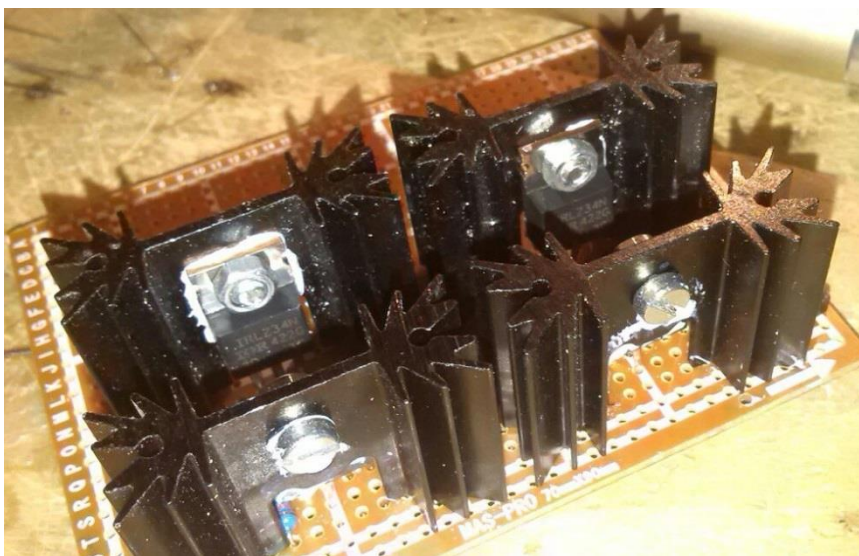
Později jsem upgradoval na diodu MBR10100 v pouzdru TO-220. Její maximální trvalý proud je 10 A a špičkově dokonce 150 A. Zvolil jsem ji pro dobré parametry a skvělou možnost přimontování na chladič.

### 2.3.2.3 Chlazení

Všechny typy tranzistorů při spínání generují teplo. Toho je u MOSFETů značně méně než u bipolárních typů, ale i tak není zanedbatelné. Proto se tranzistory umísťují na pasivních chladičích. Toto teplo je způsobeno ztrátovým výkonem, tvořícím se kvůli vnitřnímu odporu v sepnutém stavu. (lze spočítat jako  $R_{DS(on)} \times I_D$ ) Další ztrátový výkon může být generován, pokud MOSFET nebudíme „čistým“ obdélníkem, ale nějakým zakulaceným signálem, či signálem s malou strmostí náběžných a sestupných hran.

Proto jsou tranzistory přimontovány na pasivních, hliníkových chladičích. Přenos tepla z tranzistoru na chladič lze také zlepšit použitím teplovodivé pasty nebo teplovodivé fólie. Takovýto mezičlen vyplní mikroskopické škvíry a mezery a přeneše se tak maximum tepla.

Mnou zvolené chladiče jsou rozměru 42 x 12 x 26 mm s osmi žebry na každé straně a při všech testech zůstaly naprosto chladné (Obr. 6). Jako teplovodivou pastu jsem použil výrobek MX-2 od firmy Arctic Cooling.



Obr. 6: Tranzistory přichycené na chladičích

### 2.3.2.4 Ochrany tranzistorů

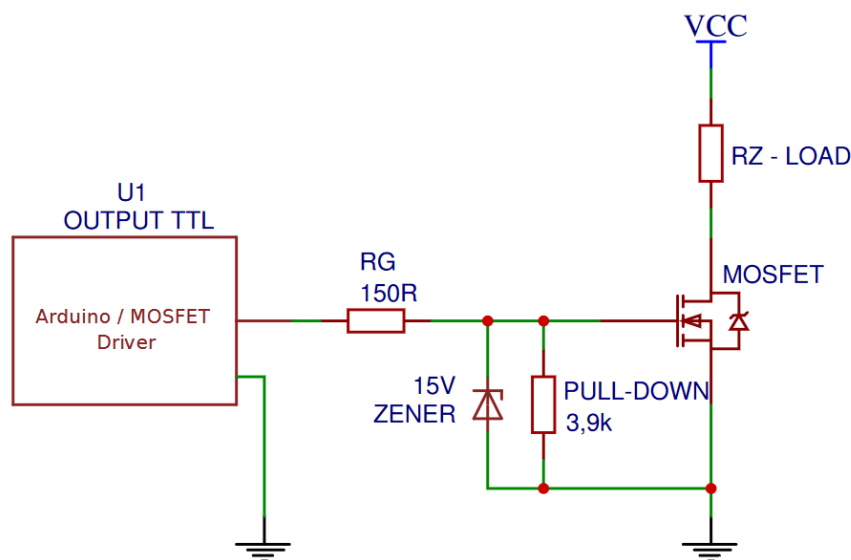
Citlivé tranzistory můžeme dodatečně chránit použitím několika pasivních prvků. Nejrozšířenější ochranou je pull-down rezistor umístěný mezi gate tranzistoru a source. Má vysokou hodnotu mezi 1 k $\Omega$  – 1 M $\Omega$  a zajišťuje, aby se MOSFET v okamžicích, kdy není ničím buzen, neotevřel sám a nespustil tak zátěž.

Dalším ochranným prvkem je Zenerova dioda připojena mezi gate a source. Její průrazné napětí v závěrném směru volíme mezi 15 – 20 V. U běžných unipolárních tranzistorů se maximální napětí  $U_{GS}$  pohybuje právě na hodnotě  $\pm 20$  V, při jeho přesáhnutí hrozí trvalé

poškození. Těmto vyšším napětím zabrání právě ona Zenerova dioda. Při nebezpečně vysokém napětí se totiž otevře a svede napěťovou špičku do země.

Třetí jednoduchou, pasivní ochranou je rezistor mezi gate MOSFETu a budícím prvkem. Hodnota odporu je nejčastěji mezi jednotkami a stovkami ohmů. Jeho funkcí je omezit proudové špičky jdoucí z budiče MOSFETů tak, aby se budič nepřetěžoval. Zároveň hodnotu volíme natolik malou, že se výrazně neomezí rychlost otevírání a zavírání tranzistoru.

Při konstrukci mého řešení jsem volil pull-down rezistor o hodnotě 3,9 k $\Omega$ , Zenerovu diodu, otevírající se při hodnotě napětí 15 V a omezovací gate rezistor o velikosti 150  $\Omega$  (Obr. 7).



Obr. 7: Ochrany MOSFETu, zobrazené ve schématu

### 2.3.2.5 Proudové posílení cest

Regulátor jsem pájel a stavěl na univerzálním plošném spoji. Jeho cesty byly tvořeny z vrtaných cest o tloušťce mědi 35  $\mu\text{m}$  a šířce cesty 2 mm. Jednoduchou úvahou dojdeme k výsledku, že takovýto přenos není dostačený a je nutné cesty proudově posílit. U mých testovacích výrobků jsem nechtěl riskovat poddimenzovanost, a proto jsem na cesty nanesl silnou vrstvu cínu.

### 2.3.3 Vlastní regulátor – výsledek testování

Testování vlastních regulátorů (postupně jsem jich postavil přes 5 kusů) pro mne bylo velmi frustrující a zabralo mi nejvíce času z celé stavby. Průběh byl pokaždé stejný, strávil jsem mnoho dlouhých hodin vývojem a výrobou výkonového regulátoru, poté jsem jej montoval, prováděl postupně všechny testy – ty spočívaly v postupném zvyšování napětí, zvyšování zátěže motoru, připojování dalších prvků, atd. Po tomto všem se zdál být regulační prvek jako úspěch. Proto jsem na koloběžku připojil mé voltmetry, ampérmetry, zapnul digitální kameru

a jel jsem se projet „do terénu“ na silnici před dům. Tady ovšem přišel zádrhel a regulátor se pokaždé spálil.

Zajímavé bylo, že pokaždé se jednalo o jinou závadu, nebo alespoň jiný typ průrazu tranzistoru. Postupně jsem tak přidával všemožné ochrany, pročítal internetové poradny a konzultoval s vyučujícími ve škole. Nejvíce jsem se však dozvěděl v okamžiku, co jsem si sehnal osciloskop. Jak je na obrázku níže vidět (Obr. 8) – motor tvoří při rozeznutí velké napěťové špičky (elektromotor si lze představit jako velkou cívku, která se brání změně protékajícího proudu a při PWM regulaci tak generuje napěťové špičky). O tyto špičky se měla starat Shottkyho dioda, antiparalelně připojena k motoru, avšak ukázalo se, že v okamžiku kdy je motor zatížen nestíhá potlačovat a napěťové špičky tak nevratně prorazí tranzistory.

V době tohoto zjištění jsem jednak neměl morálku pokračovat v tvorbě vlastního regulátoru a také jsem již měl doručení komerční regulátor. Proto jsem po 20 zničených tranzistorech odstoupil od nápadu vlastního regulátoru a pořídil si řešení hotové, funkční<sup>3</sup>.



Obr. 8: Napěťové špičky tvořené motorem, zobrazené na osciloskopu

### 2.3.4 Volba komerčního regulátoru

Volba komerčního regulátoru má několik aspektů, zasluhující zohlednění. Prvně se jedná o cenu, ta by měla být samozřejmě co nejnižší. Byl by nesmysl platit za regulátor větší částku než za elektromotor s bateriemi dohromady. Avšak při použití BLCD není výjimkou, že je ESC dražší než elektromotor. Může to být i přes dvojnásobek ceny motoru. Zde se však věnuji spíše PWM regulátorům. Dalším klíčovým parametrem je jejich maximální spínaný výkon. Nedoporučuje se používat regulátor na jeho hranici (regulátor s  $P_{\max} = 500 \text{ W}$

<sup>3</sup> Jen pro zajímavost – mnou pořízený regulátor používá dvacetinásobný počet Shottky diod pro toto potlačení. Proto se nyní již nedívám, že mnou implementovaná, jedna, nestíhala chod motoru dostatečně „kultivovat“.



s elektromotorem 500 W), proto volíme s určitou výkonovou rezervou. Třetí, neméně důležitou vlastností je možnost připojení mikroprocesoru<sup>4</sup>.

Kvůli nízké ceně a dobrým parametrům jsem použil PWM regulátor zaslaný z internetové stránky eBay.com. Jeho kódové označení od výrobce je XY-1260 (Obr. 9). Parametry jsou následující: maximální trvalý výkon až 3000 W, maximální trvalý proud 60 A, napájecí napětí 10 – 50 V. Později, po rozkreslení schématu, jsem na něm identifikoval body, na které stačí pomocí D/A převodníku přivést napětí 0 – 5 V DC. Přímou úměrou tomuto napětí se na výstupu otevírají MOSFET tranzistory v rozsahu 0 – 100 % střidy.



Obr. 9: Zakoupený PWM regulátor

## 2.4 Kabeláž

Pro rozvod všech signálů a výkonu je žádoucí použít odolnou, kvalitní kabeláž s co možná nejnižším vnitřním odporem. Hlavní žílou z baterií do regulátoru a z regulátoru do motoru je silná černo-rudá dvojlinka s průřezem  $2 \times 4 \text{ mm}^2$  (8 AWG). Díky tomu jsou ztráty minimální a kabely se vůbec nezahřívají. Sekundární rozvod osvětlení a napájení periferií je opět veden dvojlinkou, tentokrát s průřezem  $2 \times 0,75 \text{ mm}^2$  (22 AWG). Zbytek čistě signálových a sběrníkových linek je veden pomocí tenkých  $0,14 \text{ mm}^2$  (38 AWG) drátků.

---

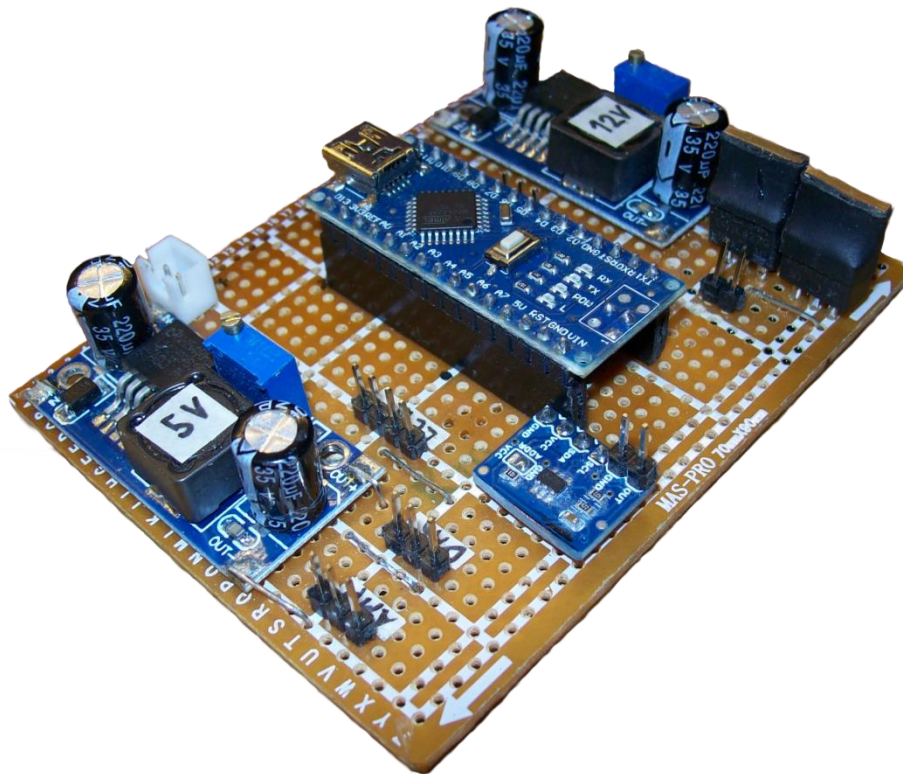
<sup>4</sup> Potřebujeme být schopni napojit se na regulátor a ovládat jej externě přes I/O pin naší řídicí jednotky. Na internetu se takto snadno napojitelná komerční zařízení označují jako „hackable“ – tedy lze se do nich snadno „prolomit“.

## 2.5 Mikroprocesor a periferie

### 2.5.1 Výběr mikroprocesoru

Existuje mnoho typů mikroprocesorů, vhodných pro takovýto projekt. Zde záleží zcela na preferencích jedince. Lze použít jak PICAx (založený na architektuře PIC), či STM32, ATmega nebo zcela jiný čip. V případě požadavku na vyšší výkon, či možnosti programování v pythonu lze využít mikropočítač Raspberry Pi, zvláště v jeho miniaturní verzi Zero.

Já však zvolil velmi jednoduché a rozšířené Arduino. Jde o open-source projekt s velkou komunitou a velmi dobrou dokumentací. Využívá mikroprocesor rodiny ATmega. Použité Arduino Nano V3 využívá ATmega328P. Arduino Nano jsem zvolil pro jeho malé rozměry, při současném zachování velkého množství I/O portů. Umístil jsem jej do slotu, umístěného na řídicí desce (Obr. 10).



Obr. 10: Řídicí deska s vývojovou deskou Arduino

### 2.5.2 Vstupní periferie

#### 2.5.2.1 Plyn

K ovládní rychlosti a momentu motoru jsem pořídil elektronickou páčku. Je prodávána jako díl k elektrokolu. Podle míry stlačení palcem se zvyšuje napětí na jejím výstupu. Toto napětí

převodu integrovaným A/D převodníkem na Arduinu na napětí a podle něj nastavuji střidu k otevření tranzistorů ve výkonovém regulátoru.

### 2.5.2.2 Tlačítka

Aby bylo čím ovládat pohyb v menu, světla či další prvky na koloběžce, přidal jsem 2 tlačítka k jednomu existujícímu na modulu plynové páčky. Původně byl na jejich místě voltmetr (Obr. 11). Ten jsem ale vůbec nepotřeboval, proto jsem jej nahradil modrým a bílým tlačítkem (Obr. 12).



Obr. 11: Plynová páčka před úpravou



Obr. 12: Upravená plynová páčka (dvě přidaná tlačítka)

### 2.5.2.3 Ampérmetr

Ampérmetrem měřím protékající proud přímo u baterií. V koloběžce jsem použil čip ACS758 v jeho jednosměrné - 100A verzi (celým názvem ACS758LCB-100U-PFF-T). Funguje na principu Hallovy sondy. Díky tomu je zcela oddělený od měřené veličiny a nenastává problém ovlivnění. Na jeho výstupu čipu je analogové napětí, které se změní o 40 mV na ampéru. Tuto změnu Arduino měří a přepočítává zpět na pravou hodnotu proudu.

### 2.5.2.4 Reed - měření rychlosti

V angličtině zvaný „reed switch“ je magnetický spínač, nejčastěji jazýčkové relé, snímající magnet umístěný ve výpletu kola. Podle rozmezí pulzů a poloměru kola pak lze spočítat



aktuální rychlost. Tuto informaci zobrazuji na LCD a připočítávám pro získání ujeté vzdálenosti.

#### 2.5.2.5 Čtení napětí baterie

Abychom mohli zobrazovat aktuální napětí na baterii, počítat výkon jdoucí do motoru a kontrolovat, že není baterie příliš vybitá, používáme A/D převodník. Arduino dokáže číst v rozsahu 0 – 5 V, proto jsem předřadil odporový dělič složený z dvou rezistorů o hodnotě 47 k $\Omega$  a 330 k $\Omega$ . Díky tomu dokážeme číst v rozsahu 0 – 40 V, což stačí pro pokrytí napětí baterie 24 – 33,6 V.

### 2.5.3 Výstupní periferie

#### 2.5.3.1 PWM regulátor

Z hlavní, řídicí jednotky s Arduinem vysílám dva signály. Jedná se o signály PWM a Enable. Jelikož má zakoupený regulátor pin Enable – v provozu, lze volit mezi provozem a stand-by. Při zapnutí koloběžky a během bootování je regulátor ve stand-by. Nehrozí tedy, že by se elektrokoloběžka sama rozjela. Až v bezpečné chvíli se regulátor zapne a začne pracovat.

Reverzním inženýrstvím jsem zjistil, že regulátor nastavuje střidu podle vstupního napětí. Toto napětí generuji z Arduina (Arduino nemá vestavěný D/A převodník) externím, 12bitovým D/A převodníkem MCP4725. 12 bitů je velmi dobrá přesnost, proto lze velmi jemně regulovat výkon motoru.

#### 2.5.3.2 LCD

Jako hlavní zobrazovací prvek jsem použil čtyřřádkový LCD zobrazovač s 20 znaky v každé řádce (Obr. 13). Jistě by stačila i menší, pouze dvouřádková varianta, ale rozhodl jsem se použít velká písmena pro měřič rychlosti – z toho důvodu by již nezbylo místo při ostatní informace na displeji. Pro zajištění základní ochrany proti vodě je displej zasazen do plastové krabíčky.



Obr. 13: Vestavěný displej a údaje na něm se zobrazující

## 2.5.4 Osvětlení

Dobré osvětlení je nutností pro jízdu v jakýchkoli podmínkách, zvláště za snížené viditelnosti. Vzadu je vhodné použít červené brzdové světlo. Vepředu naopak umístit hlavní, bílý světlo, nebo více světlo. Dodatečnými prvky jako jsou oranžová výstražná světla a světla signalizující změnu směru jízdy jsem se rozhodl, pro primární použití koloběžky na komunikacích určených pro chodce, neosadit. Naopak jsem přidal modré podsvícení realizované pomocí vodotěsných LED pásků. Spolu s modrou barvou koloběžky to tvoří velmi pěkný efekt, zvláště v noci (Obr. 14).

Na řídítkách jsem použil dvojici dvojitých LED svítelen značky SolarStorm, opět pořízených na eBay.com. Jejich změřený příkon je cca 16 W na jedno světlo, tedy cca 30 W světelného výkonu vpředu. Vzadu je brzdové světlo, řízené PWM regulací – jedním tranzistorem IRLZ34N buzeným přímo z pinu Arduina. Toto světlo svítí asi na 10 % střídy při běžné jízdě. Při použití brzdy se ovšem rozsvítí na 100 % výkonu a je tak daleko viditelnější. Jeho výkon je cca 10 W.



Obr. 14: Osvětlení na koloběžce během noci

## 2.6 Program

Vývojová deska Arduino se programuje v jazyce podobném jazyku C či C++. Jedná se o jednoduchý ale zároveň efektivní způsob, jak ovládat periferie. K programování a kompilování jsem nejdříve využíval dodávaného ArduinoIDE, později jsem však přešel na open-source projekt PlatformIO. Tento projekt navíc využívá editor Atom, který oproti editoru v ArduinoIDE obsahuje našeptávač funkcí a proměnných. Díky tomu je vytváření kódu rychlejší a pohodlnější.

## **3 REALIZACE - STROJÍRENSKÁ ČÁST**

### **3.1 Převod síly**

#### **3.1.1 Způsob přenosu síly**

Převod je jediné spojení mezi motorem a hnaným kolem, proto musí být dostatečně robustní a zároveň flexibilní. Na výběr jsou pevná spojení, ozubenými koly, spojení řetězem a spojení řemenem. Ozubená kola zde nejsou příliš šťastným řešením, jelikož například při defektu by bylo třeba rozebrat celý systém uchycení. Řemeny jsou dobrým řešením, avšak pro tuto aplikaci se hodily méně než řetězy. Použitý řemen by trpěl, vzhledem k prostředí kde by byl provozován. Kamínky, bláto a ostatní nečistoty z vozovky by se mohly dostávat do řemene a tím ho ničit a omezovat jeho funkčnost. Řešením by bylo přidat kryt, to by ovšem zbytečně zvyšovalo složitost systému a hmotnost. Dalším nevhodným parametrem řemenu je jeho potřebná tloušťka pro přenos většího množství momentu. V mém případě jsem byl velmi omezen na šíři maximálně 10 mm (z důvodu malého prostoru vedle hnaného kola). To by nemuselo ve všech případech spolehlivě stačit, proto jsem přikročil k použití řetězu.

#### **3.1.2 Volba rozteče řetězových článků**

Od použitého rozměru se odvíjí masivnost řešení, možný přenesený moment a převodový poměr (počet ozubených kol na jedno kolečko). Nejdříve jsem zamýšlel použít řetěz z jízdního kola. Ten se zdál jako dobré řešení pro svojí velkou rozšířenost, nízkou cenu dílů a velkou pevnost. Později jsem byl nucen tuto myšlenku opustit, pro jeho velkou šíři a nízkou ohebnost článků okolo kolečka. Nedokázal by se tedy otočit dostatečně snadno v malém prostoru. Jeho alternativami jsou řetězy používané v motorových motokárách a v malých motorkách "Minibike". Takové řetězy jsou velmi vhodné do těsných prostor, při zachování velmi dobrých parametrů. Jejich jedinou větší nevýhodou je nižší rozšířenost a tím pádem i vyšší cena.

Nejrozšířenější velikosti jsou #25 a #35. Já zvolil menší variantu #25 (Obr. 15).



Obr. 15: Porovnání řetězů #35 (dole) a #25 (nahore) [3]

### 3.1.3 Převody

Určení převodového poměru je jednou z velmi důležitých záležitostí u stavby takového vozidla. Je třeba proto propočítat jakou rychlost od takového vozidla požadujeme, jaký točivý moment je vhodný a jak strmé kopce hodláme vyjíždět. Podle těchto dat můžeme později určit hodnotu převodového poměru a tím i počty zubů na jednotlivých ozubených kolech.

Rychlost vozidla a točivý moment jsou dvě veličiny, navzájem se ovlivňující. Je třeba vyvážit poměr mezi nimi na ideální poměr zrychlení, rychlosti a použitelnosti.

Například pokud bychom rádi vysokou rychlost, musíme vzít v potaz, že motor nemusí mít dostatek momentu na to dosáhnout jí. Druhým extrémem může být vozidlo, které zvládne vyjet všechny velmi strmé kopce a překážky, ale jeho maximální rychlost bude 1 km/h.

Já jsem zvolil převodový poměr 35 : 11. Tedy je potřeba 35 otáček na vstupu pro vytvoření 11 otočení na výstupním kolečku. Tímto převodem se snížila teoretická maximální rychlost z 143,5 km/h na 45,1 km/h ale zvýšil se moment z 1,91 Nm na 6,08 Nm. Tím se značně zvýšila schopnost akcelarovat a vyjíždět kopce.

## 3.2 Přichycení motoru

Přichycení motoru by mělo být dostatečně robustní, aby vydrželo vibrace a váhu motoru, avšak zároveň by se mělo jednat o modulární systém, který lze v případě defektu rozebrat a opravit například hnané kolo, nebo součást rámu samotného.

U mé koloběžky jsem se vydal hybridní cestou, kde je hlavní nosná část rámu přivařena k základně, zatímco motor samotný je přichycen k plechu šrouby. Pro nastavení ideálního



napnutí řetězu jsou v plechu vytvořeny 17mm drážky, umožňující horizontální pohyb motoru (Obr. 17). Plech s motorem je též přišroubován do přivařených jeleků tvaru 'U' (Obr. 16).



Obr. 16: Přichycený motor, již s napnutým řetězem



Obr. 17: Plech s drážkami, zde během lakování

### 3.3 Boxy a ochrana

Pro zajištění alespoň minimální ochrany před vodou a dalšími vlivy je vhodné elektroniku a další citlivé prvky umístit do boxů a ochranných obalů. Nejedná se o plnou voděodolnost či dokonce vodotěsnost, ale při prvních kapkách deště takovýto box ochrání desky plošných spojů před okamžitým zkratem.

Deska hlavní elektroniky je umístěna v modré, oblé krabičce zakoupené v německé pobočce firmy Conrad. Na ní je přišroubovaná deska PWM regulátoru. Aby byl regulátor kryt před okolím, je zakryt na míru vytvořeným, plastovým obalem. Toto zakrytí je vyrobeno z ABS plastu, vytisknutého na 3D tiskárně Prusa i3 (více o tom v kapitole 3D tisk).

### 3.4 Uchycení a umístění baterií

Dalším důležitým rozhodnutím bylo umístění baterií. Baterie jsou velmi rozměrné, těžké a křehké - musí být v bezpečí. Těžiště elektrokoběžky by mělo být nízké<sup>5</sup>. Proto se snažíme baterie umístit co nejnižší. Proto není vhodným řešením mít těžké akupacky nahoře u řídicích či dokonce na řídicích samotných. Mimo jiné má takto vysoké těžiště za výsledek nestabilitu na stojácích či jiných podpěrných zařízeních. Vhodným nápadem je tak zakomponování baterie okolo, nebo přímo uvnitř rámu koloběžky (Obr. 18).

Uchycení řešíme tak, aby se baterie při jízdě nehýbaly a držely pevně na místě. V případě výměny či změny je nutné toto uchycení otevřít či rozpojit. Řešeními jsou tedy spojky vytisknuté na 3D tiskárně, kovové prvky, či nějaký způsob svázání s rámem. V mém případě jsem použil několik silných stahovacích pásek, pro jejich jednoduchost a vysokou efektivitu. Jedná se také o velmi levné řešení, nezanechává žádné stopy poškození (například lepidla) a při tvorbě prototypů jde o neocenitelnou pomůcku.

---

<sup>5</sup> Toto platí u každého kolového vozidla – nízké těžiště způsobí dobrou ovladatelnost v zatáčkách a vysokou stabilitu. Dalším prvkem, vylepšující ovladatelnost a zkracující například brzdnou dráhu je rozložení váhy 50 : 50 mezi přední a zadní kolo.



Obr. 18: Umístění a uchycení baterií v rámu koloběžky

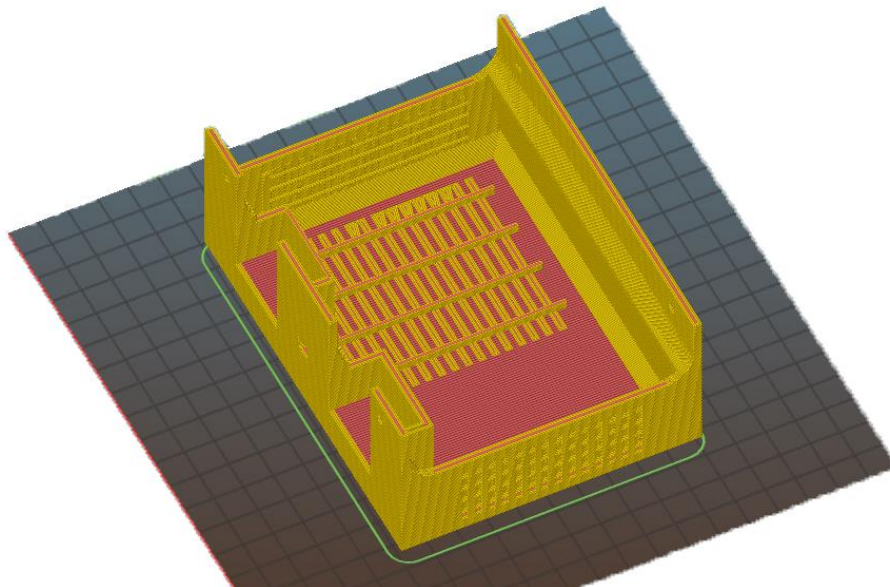
## 3.5 3D tisk

Moderní 3D tiskárny jsou velmi schopné stroje. Dají se jednoduše využít pro tisk specifických částí a spojek, který by jiným způsobem nebylo schopné získat. Na mé koloběžce jsem jí využil hned třikrát, ovšem existuje i spousta dalších vylepšení a úchytů, které bych mohl tisknout.

### 3.5.1 Návrh modelu

Pro návrh modelu a jeho odladění jsem používal freeware Blender. Jedná se o open-source projekt, dostupný na všech platformách. Je velmi jednoduchý pro začátečníky a na internetu je plno návodů a tutoriálů. Jedinou nevýhodu, kterou jsem v procesu objevil, je složitější export to souboru .stl . Blender má tendenci model poškodit a deformovat. Proto jsem v dalším kroku použil software od firmy Autodesk – program Netfabb. Jedná se sice o placený program, avšak při použití 30denní trial verze lze modely opravit a optimalizovat pro bezpečný 3D tisk.

Posledním krokem, u validního modelu, je použití sliceru – programu, který „rozřeže“ model na vrstvy, vygeneruje výplň modelu a vytvoří strojové instrukce pro pohyb os X, Y a Z. Takovému souboru dokáže 3D tiskárna porozumět a začít s tiskem. Zde jsem využil dalšího programu zdarma – Slic3r (Obr. 19).



Obr. 19: Ukázka z programu Slic3r – rozřezání modelu krytu regulátoru

### 3.5.2 Tisk – parametry tiskárny

K tisku jsem využíval tiskárnu Prusa i3 Plus. Filamentem byla 1,75mm struna materiálu ABS. Teplota trysky byla 230 °C a podložka byla vyhřívána na 100 °C. Model byl tisknut po vrstvách 0,1 mm a vnitřní výplň materiálem se pohybovala mezi 20 a 40 %.

### 3.5.3 Výsledek tisku

Výsledky byly velmi uspokojivé, všechny modely splňovaly kritéria pevnosti a pružnosti, proto jsem nic nemusel tisknout podruhé. Například kryt regulátoru se povedl velmi (Obr. 20).





Obr. 20: Výsledný produkt - kryt regulátoru

#### 4 ZÁVĚR

Cíl, postavit plně motorizovanou koloběžku se podařilo naplnit. Výsledkem je výrobek (Obr. 21), schopný dojezdu minimálně 10 km, delší vzdálenost jsem netestoval. Podle měření baterií se však dá předpokládat dojezd přesahující 15 km. Komfortní cestovní rychlost se pohybuje okolo 20 – 25 km/h. Není problém cestovat i rychleji, ovšem poté spotřeba energie výrazně stoupá. Osvětlení je plně dostatečné a nepřehlédnutelné. Doba nabíjení je ještě snesitelně dlouhá. Dvě hodiny se dá čekat, avšak v nějakých situacích bych býval byl ocenil dobu kratší. Proto byl cíl naplněn a to v plném rozsahu.

V práci jsem popsal mé zkušenosti a věřím, že mohou pomoci každému, kdo se rozhodne vyrobit či porozumět funkci elektrokoloběžky, elektrokola či jiného elektrického vozidla, jako může být auto, formule či motokára.



Obr. 21: Pohled na hotovou elektrokoloběžku

## 5 DISKUZE

I přes veškerou snahu jsem pár věcí nezvládl na 100 % a i proto je na koloběžce hned několik objektů, kterým bych rád v budoucnu věnoval zájem. V první řadě se jedná o motor. Kvůli omezením místem jsem mohl osadit převodové kolečko s pouhými 35 zuby. Rád bych použil více, ovšem nevešlo by se bez úprav rámu a dalších částí konstrukce. Kvůli tomu má motor menší moment síly a nastává problém vyjíždět táhlejší kopce. Také rozjezdy jsou pomalé a velmi energeticky náročné. Abych tuto nevýhodu částečně eliminoval, krátkodobě provozuji elektromotor ve špičce. Tedy do 500W motoru dodávám více než 800 W. S tím avšak souvisí zahřívání vinutí. V raných fázích projektu, když jsem ještě nehlídal teplotu, jsem motor rozzhřivil tak, že na jeho povrchu jsem naměřil přes 100 °C.

Dalším problémem může být nehotovost projektu jako taková. Po několika desítkách jízd se mi například „vyklepal“ konektor. I proto nyní pracuji na nové, kompaktnější řídicí elektronice, která však v tento okamžik není hotová a připravená k provozu.

V příští verzi bych rozhodně zvážil použití BLDC motoru místo momentálního motoru. Baterie se zdají dobrou volbou, avšak v poměru cena/výkon vycházejí lépe Li-Ion články typu 18650, které se v podobných projektech používají nejčastěji.

### Zdroje:

[1] Turnigy 5000mAh 4S 25C Lipo Pack. In: *Hobbyking.com* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-5000mah-4s-25c-lipo-pack.html](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-5000mah-4s-25c-lipo-pack.html)

[2] PWM fading example. In: *Arduino.cc* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://playground.arduino.cc/Tutorials/Fading>

[3] How To Remove/Add Chain Link Without Chain Tool :). In: *Youtube.com* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=R1ZHNFZvaw>