

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTRICKÝCH POHONŮ A TRAKCE



**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ**  
Spojujeme elektrotechniku a informatiku

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tester baterií

**Autor:** Jan Veselý

**Vedoucí práce:** Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Praha, květen 2017





# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veselý** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **406420**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Tester baterií**

Název bakalářské práce anglicky:

**Battery tester**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši baterií používaných v automobilech
- 2) Popište způsob jejich testování, zjišťování životnosti a stavu a předepsané zkoušky
- 3) Navrhněte HW a SW testovacího zařízení
- 4) Proveďte ověřovací měření na vyvinutém zařízení

Seznam doporučené literatury:

- [1] <http://www.exide-cz.cz/cz/files/produkty2/obrazky/168-539A-CZ,%20Manual,%20Exide%20EBT-165P.pdf>  
[2] <http://www.ledmania.cz/aa/test-tuzkovych-baterii>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vít Hlinovský CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **10.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



## **Anotace**

V úvodu si představíme počátky elektrických článků. Po uvedení do historie vysvětlíme a popíšeme princip, na kterém funguje elektrický článek jako elektrochemický zdroj a jaké jsou jeho vlastnosti. V další kapitole začneme s druhy testování bateriových článků, vlivy na životnost, popíšeme si normy, které musí splňovat baterie od obecných až po armádní standardy a na závěr kapitoly popíšeme různé způsoby testování bateriových článků. V předposlední kapitole rozebereme vývoj testeru baterií, určený pro cyklické zatěžování, který bude využíván pro potřeby měření univerzitního týmu ČVUT eForce FEE Prague Formula. Ve vývoji popíšeme návrh a výrobu hardwarové části a zmíníme se o použitém software. Poslední kapitola sumarizuje výstup vyvíjeného zařízení.

## **Klíčová slova**

elektrický článek, baterie, testování, spínaný zdroj, polo-můstek, cyklické testování

## **Annotation**

At first, we present the beginnings of electric cells. After introduction into history we explain and we describe princip of electric cell and something about its parametrs and properties. In next section we start describing types of testing of battery cells, effects on service life, we describe some standards, which battery cell have to meet from general norms to army norms and at the end of section we describe many ways for testing battery cells. Last but one section we talk about development of battery tester, designed for cycle testing, which will be used for requirement measure with university team of CTU eForce FEE Prague Formula. In development we describe proposal and manufacture hardware of device and we mention about used software. The last chapter summarized the output of device.

## **Keywords**

electric cell, battery, testing, boost converter, half-bridge, cycle testing



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

podpis autora práce





## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Hlinovkému, CSc. za trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat našemu týmu elektrické formule eForce, kde jsem měl možnost čerpat mnoho zajímavých zkušeností, Fakultě Elektrotechniky, za poskytnutí prostor a nástrojů pro výrobu a nakonec mé rodině, která se mně snažila podporovat celé mé studijní období.



# Obsah

<b>1</b>	<b>HISTORIE [1]</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ZÁKLADNÍ PRINCIP BATERIE [1]</b>	<b>1</b>
2.1	ROZDĚLENÍ BATERÍ . . . . .	2
2.1.1	Parametry . . . . .	3
<b>3</b>	<b>TESTOVÁNÍ, ŽIVOTNOST A PŘEDEPSANÉ NORMY [4]</b>	<b>6</b>
3.1	ŽIVOTNOST . . . . .	7
3.2	NORMY PRO BATERIE [10] . . . . .	12
3.3	ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ BATERIOVÝCH ČLÁNKŮ [4] . . . . .	13
3.3.1	NEPŘÍMÉ TESTOVÁNÍ . . . . .	14
3.3.2	TESTOVÁNÍ KVALITY . . . . .	14
<b>4</b>	<b>NÁVRH TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ</b>	<b>17</b>
4.1	HARDWARE [14] . . . . .	17
4.1.1	ELEKTRICKÉ SCHÉMA . . . . .	18
4.1.2	DESKA PLOŠNÉHO SPOJE . . . . .	28
4.2	SOFTWARE [16][15][13] . . . . .	30
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>33</b>



## 1 HISTORIE [1]

První počátky zdrojů elektrické energie se datují až do roku 1799. Za vůbec první zdroj dnes považujeme Voltův článek, pojmenovaný po jeho vynálezci Alessandru Voltovi. Jednalo se o primární článek, což znamená, že už ho nelze znovu dobít. Článek byl tvořen zinkovou a měděnou elektrodou a elektrolytem byla zředěná kyselina sírová. Díky rozdílným elektrochemickým potenciálům materiálů použitých na elektrody článek vykazoval 1,1V. Alessandro Volta svůj článek využil pro stavbu tzv. Voltova sloupu, kde jednoduše spojil jednotlivé články do série a vznikl tak první zdroj elektrického proudu.

Dalším článkem v historii je už méně známý Leclancheův článek. Ten si nechal roku 1866 patentovat vynálezce Georges Leclanché. Oproti Voltově článku Leclanché nahradil měděnou elektrodu za elektrodu z oxidu manganičitého a elektrolytem byl chlorid amonný. Díky změně materiálů dosáhl G. Leclanché napětí až 1,5V a celkem menšího vnitřního odporu. Leclancheův článek dal základ všem dnes známým zinko-uhlíkovým článkům.

Dále se vývoj ubíral vývojem alkalického článku, kde došlo ke změně elektrolytu nebo změnou kladné elektrody za oxid stříbrný a alkalické články tak vykazovali lepší životnost. Později se změnou různých materiálů elektrod nebo změnou elektrolytů vyvinuli články s vyšším napětím, větší elektronovou hustotou, lepší životností a větší kapacitou. Dnes je nejnámějším prvkem používaných v bateriových článcích lithium, používané pro zápornou elektrodu. Z nejnámějších například lithium-iontový, lithium-polymerový nebo lithium-zinkový akumulátor.

## 2 ZÁKLADNÍ PRINCIP BATERIE [1]

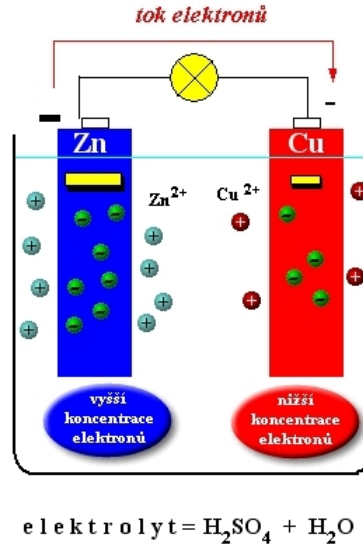
Baterie je stroj, který mění chemickou energii na elektrickou díky rozdílným potenciálům jednotlivých elektrod. Elektrické potenciály jsou důsledkem chemických reakcí mezi elektrodou a elektrolytem. Rozdíl potenciálů elektrod vyvolává elektromotorické napětí – hovoříme tedy o tzv. samovolné reakci. Reakci vyvolané průchodem elektrického proudu říkáme elektrolyza.

Výsledné elektromotorické napětí článku můžeme vyjádřit jednoduše vztahem (1).

$$U_m = U_1 - U_2 \text{ [V]} \quad (1)$$

$$U_m = U_1 - U_2 = 0,34 - (-0,76) = 1,1 \text{ [V]} \quad (2)$$

Kde  $U_m$  je elektromotorické napětí,  $U_1$  je napětí kladné elektrody a  $U_2$  napětí elektrody se záporným potenciálem. V případě Voltova článku (2) je potenciál pro měděnou elektrodu +0,34 V a pro zinek -0,76 V, viz. Obrázek 1: Voltův článek [2].



Obrázek 1: Voltův článek [2]

Připojíme-li k článku do obvodu zátěž a vyvoláme tak elektrolýzu, začne se postupně snižovat uložená energie. Říkáme, že se článek začne vybíjet. Tento proces může být vratný nebo nevratný. Články, který tento proces mají nevratný, to znamená, že je nemůžeme znovu nabít, řadíme jako primární články. U článků, které můžeme znovu nabít, jedná se tedy o vratný proces, říkáme, že jsou články sekundární nebo zkráceně akumulátory.

Úbytek energie, tedy snížení elektromotorického napětí článku, je způsobeno procházejícím proudem a vlivem vnitřního odporu článku. Výsledné napětí tedy lineárně klesá podle vztahu (3).

$$U = U_m - R_i I \text{ [V]} \quad (3)$$

Kde  $U$  je svorkové napětí článku,  $R_i$  je vnitřní odpor článku a  $I$  je procházející proud.

## 2.1 ROZDĚLENÍ BATERIÍ

Baterie rozdělujeme na primární a sekundární články. Dále je rozdělujeme na základě jejich parametrů, mezi které patří elektromotorické napětí (napětí nezatíženého článku, tedy zapojení na prázdko), které je dáno použitou chemií na elektrolyt a materiálem elektrod. Kapacity neboli množství uložené elektrické energie v článku, elektrického výkonu, který odpovídá množství energie, kterou je schopen článek dodat za jednotku času. Pak také velikostí vnitřního odporu, účinnosti, životnosti danou počtem cyklů nabití a vybití akumulátoru a jejich cenou. Podle výše uvedených parametrů pak rozhodujeme použití článku.

### 2.1.1 Parametry

Nejznámější články obsahuje Tabulka 1: Parametry známých článků.

Název	Elektrody, elektrolyt	Um[V]	Vlastnost
Voltův článek	+Cu, -Zn, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,1	první zdroj, pro srovnání
Lithiový článek	+MnO <sub>2</sub> , -Li, lithiové soli	1,5 - 3,7	dlouhá životnost, knoflíkové baterie
Olověný akumulátor	+PbO <sub>2</sub> , - Pb, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,1	tvrdý zdroj, záložní, startovací nebo trakční baterie
Nikl- kadmiový akumulátor	+NiO(OH), -Cd, KOH	1,2	kadmium je jedovaté, možnost velkých kapacit, malé až trakční akumulátory
Nikl-metal hydridový akumulátor	+NiO(OH), - sloučenina vodíku a hydridu kovu, KOH	1,2	nahrazuje NiCd akumulátory - odstraňuje kadmium a tudíž není jedovatý
Lithium- iontový akumulátor	+LiCoO <sub>2</sub> , -grafit, lithiová sůl např. LiPF <sub>6</sub>	3,6	dnes nejpoužívanější a nejznámější druh akumulátoru, použití od mobilních telefonů až po trakční baterie

Tabulka 1: Parametry známých článků

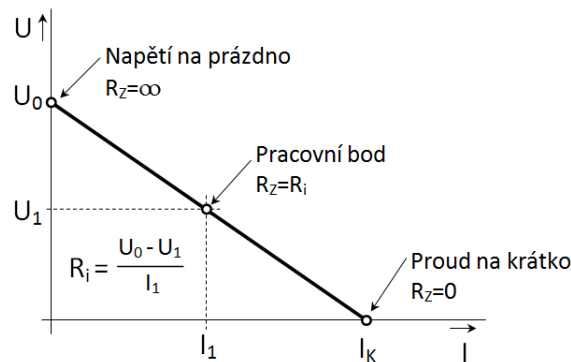
Tabulka 1 porovnává nejznámější typy článků. Uvedené elektromotorické napětí, odpovídá napětí jednoho článku. Jednotlivé články se zpravidla spojují a tvoří větší celky – baterie nebo akumulátorové bloky, tzv. „akupacky“ (z anglického Accumulator Pack).

Spojováním jednotlivých článků můžeme dosáhnout většího napětí, vyšší kapacity, většího výkonu a můžeme tak vytvořit „akupack“ vhodný pro naši aplikaci. Protože články spojujeme pro vytvoření celku, který se bude vhodným řešením, potřebujeme znát jaké napětí, kapacitu nebo výkon má mít výsledný „akupack“.

Pro trakční akumulátory je vhodné volit vyšší napětí při provozování motorů s vyšším počtem otáček a použití převodovky pro převod momentu na hřídel a nebo naopak akumulátory s vyšším proudem, pokud napájený motor přenáší svůj moment přímo na hřídel a při vyšším momentu záběru je požadavek na vyšší proudy. Například pro baterii používanou v automobilech se spalovacím motorem je nejčastěji použit olověný akumulátor, s výstupním napětím 12V a protože je použit jako startovací akumulátor je požadavek na vyšší proudy a jeho kapacita dosahuje obvykle kolem jednotek Ah. Naopak „akupacky“ používané pro trakci dosahují

obvykle desítek až stovek Ah při výstupním napětí na prázdko 12V. Hodnoty napětí a kapacit jsou voleny podle aplikace, ke které jsou akumulátory použité. Proto nejdříve potřebujeme určit parametry „akupacku“ a následně provést měření, zda zvolená konfigurace odpovídá našim požadavkům.

Budeme se tedy dívat na jednotlivé články jako na zdroje napětí a zdroje proudu. V teorii elektrických obvodů rozlišujeme ideální a skutečné zdroje napětí a proudu. Ideální zdroj napětí oproti skutečnému zdroji napětí neuvažuje vnitřní odpor  $R_i$ , respektive vnitřní odpor ideálního zdroje napětí je  $R_i = 0$ . Naopak ideální zdroj proudu oproti skutečnému zdroji proudu uvažuje nekonečně velký odpor, tedy  $R_i \rightarrow \infty$ . Napěťový i proudový zdroj je popsán Zatěžovací charakteristikou – Obrázek 2: Zatěžovací charakteristika skutečného zdroje [3].



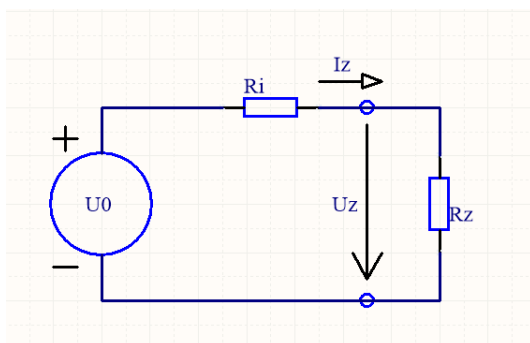
Obrázek 2: Zatěžovací charakteristika skutečného zdroje [3]

Obrázek 2: Zatěžovací charakteristika skutečného zdroje [3] popisuje zatěžování skutečného zdroje napětí. Můžeme si všimnout, že pokud na výstup nepřipojíme žádnou zátěž (odpor zátěže  $R_Z \rightarrow \infty$ ), tedy necháme rozpojené svorky, obvodem neprotéká proud a na svorkách zdroje naměříme napětí naprázdno – neboli napětí nezátíženého zdroje. Pokud svorky zdroje zkratujeme například pomocí vodiče (odpor vodičů pro zkratování zanedbáváme), bude napětí na svorkách zdroje nulové a obvodem (zdrojem a tedy článkem) bude protékat zkratový proud  $I_K$ . Zkratový proud vyjádříme pomocí rovnice (4).

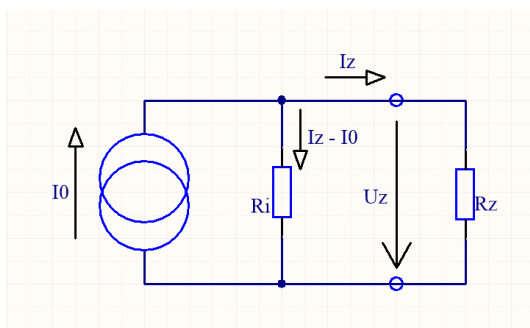
$$I_K = \frac{U_0}{R_i} [A] \quad (4)$$

Zkratový proud je velice důležitý, protože čím menší bude mít zdroj vnitřní odpor, tím větší bude při zkratu vyvolán proud. V případě ideálního napěťového zdroje, který má nulový vnitřní odpor, můžeme uvažovat nekonečně velký zkratový proud, který by měl destruktivní následky na zdroj. Pro výpočty používáme náhradní schéma pro napěťový i proudový zdroj (Obrázek 3: Náhradní schéma napěťového zdroje a Obrázek 4: Náhradní schéma pro proudový zdroj).





Obrázek 3: Náhradní schéma napěťového zdroje



Obrázek 4: Náhradní schéma pro proudový zdroj

Při spojování zdrojů, musíme tedy uvažovat jejich vnitřní zapojení a na základě toho vyvodit chování. V praxi se na články díváme většinou jako na skutečné zdroje napětí.

Napěťové zdroje můžeme spojovat jak sériově tak paralelně. Při sériovém spojení zdrojů můžeme sečíst jejich napětí. Výsledné napětí  $U$  podle (5).

$$U = \sum_1^n U_n [V] \quad (5)$$

Kde  $n$  je počet zapojených zdrojů do série. Ekvivalentně platí pro jejich vnitřní odpory. Obvodem pak prochází jeden stejný proud  $I$  – tzn. všemi zdroji stejný. Z tohoto důvodu je ideální zapojovat do série zdroje se stejným napětím naprázdno  $U_0$  a stejným vnitřním odporem  $R_i$  (nebo alespoň podobným). V případě sériového spojení zdrojů s rozdílným napětím naprázdno  $U_0$  (nebo vnitřním odporem  $R_i$ ) by mohl výsledný výkon celého bloku článků dodávat pouze jeden článek čímž by se výrazně zkrátila jeho životnost. Například pokud by první zdroj vykazoval mnohem větší napětí na prázdko  $U_0$  než druhý zdroj pak při jejich spojení do série

bude zatěžován pouze první zdroj. Druhý zdroj bude snižovat napětí prvního zdroje a bude tak snižovat celkový výstupní výkon.

Při paralelním zapojení zdrojů získáme stejné napětí, jako napětí jednoho zdroje. Na druhou stranu ale získáme větší proud  $I$ , který je dán (6)

$$I = \sum_1^n I_n [A] \quad (6)$$

Kde  $n$  je počet zdrojů spojených paralelně. V obvodu je tedy stejné napětí ale na zátěž prochází proud od všech paralelně zapojených zdrojů. V praxi se zpravidla používá kombinace sériově a paralelně zapojených zdrojů podle potřeby. Například pokud budeme potřebovat „akupack“, kde zátěž nebude odebírat velký proud můžeme si dovolit spojit články více do série a získáme tak vyšší napětí a větší množství uložené energie. Naopak například pro trakční baterie kde potřebujeme vyšší proudy například kvůli momentu motoru spojíme články více paralelně abychom získali větší proud. Výsledný výkon je pak dán součinem výstupního napětí a dodávaného proudu. Protože se bavíme o stejnosměrných hodnotách napětí i proudu můžeme výsledný výkon vyjádřit pomocí (7).

$$P = U I [W] \quad (7)$$

### 3 TESTOVÁNÍ, ŽIVOTNOST A PŘEDEPSANÉ NORMY [4]

Abychom dokázali sestavit „akupack“, který bude splňovat naše požadavky, potřebujeme znát nejen parametry článku (respektive jeho serioparalelní kombinace) ale v ideálním případě zjistit jeho chování. Při každém návrhu je jedním z nejdůležitějších parametrů, vedle jeho vlastností jako napětí nebo dodávaného výkonu, jeho životnost.

Pro určení životnosti článku (respektive životnost jeho serioparalelního spojení) můžeme buď počítat s parametry v technickém listu (anglicky datasheet), které uvádí výrobce článku nebo můžeme potřebné parametry změřit. Jelikož se v praxi často setkáváme s datasheety, kde jsou parametry uvedené pouze při ideálních podmínkách a my potřebujeme znát skutečné hodnoty v hraničních oblastech charakteristik článku, je vhodné změřit charakteristiky při nasimulovaných podmínkách. Jedna z charakteristik je závislost hloubky vybíjení (anglicky Depth of Discharge) na počtu cyklů, pak závislost vnitřního odporu  $R_i$  na teplotě a stáří článku nebo závislost počtu cyklů na kapacitě při různé teplotě.

Důležité parametry, které potřebujeme znát a které lze získat měřením jsou napětí na prázdko  $U_0$ , vnitřní odpor  $R_i$ , SoC (z anglického State of Charge) jinými slovy úroveň nabití nebo také údaj o zbývající energii v článku, SoH (z anglického State of Health) neboli stav článku a jeho schopnost dodávat požadovaný výkon a impedance  $Z [\Omega]$  nebo admitance  $Y = \frac{1}{Z} [S]$  článku

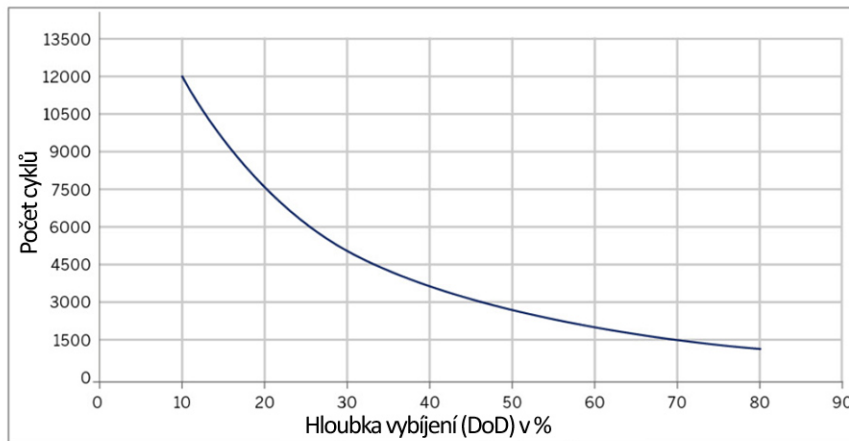
(nutno měřit při střídavém napětí). Výše uvedené parametry můžeme získat buďto přímým nebo nepřímým měřením.

### 3.1 ŽIVOTNOST

Životnost rozdělíme na dvě další podskupiny. Životnost snižovaná stářím článku a životnost snižovaná jeho cyklováním. Jeden cyklus znamená jedno úplné vybití a nabití článku. Zpravidla se počet cyklů na článek pohybuje mezi 500 – 1200 cykly, než článek ztratí 20% své jmenovité kapacity. Ztráta kapacity je způsobena zvětšením vnitřního odporu. Vnitřní odpor článku se zvětšuje obvykle 1,3x – 2x.

Měli bychom brát v potaz, že článek se vždy nevybije úplně a pak je opět bez přerušení znovu nabit na maximum. Různá hloubka vybíjení v závislosti na počtu cyklů je dána grafem DoD – Hloubka vybíjení (Obrázek 5: DoD - Hloubka vybíjení [5]).

Životnost baterie (počet cyklů) v závislosti na hloubce jejího vybíjení



Obrázek 5: DoD - Hloubka vybíjení [5]

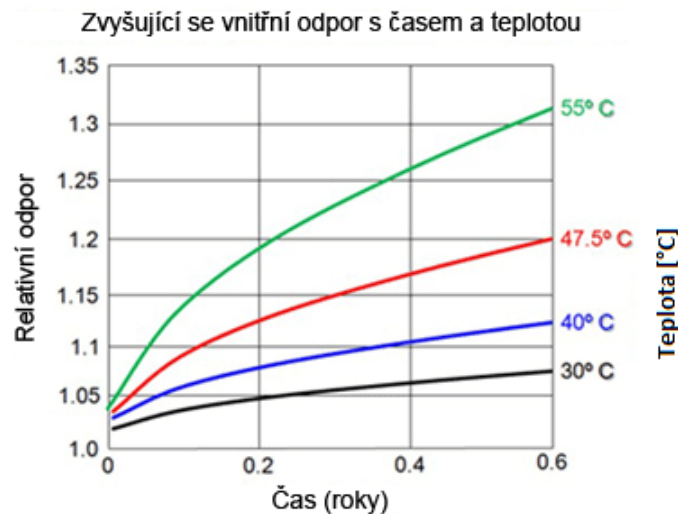
Obrázek 5 nám zobrazuje počet očekávaných cyklů baterie podle toho, jak hluboko ji budeme vybíjet. Pokud budeme vybíjet baterii o 80% její nominální kapacity (což znamená na 20% SoC), očekávaný počet cyklů baterie pak bude pouze 1500. Naopak při vybíjení článku o 30% jeho nominální kapacity (což znamená na 70% SoC) bude počet cyklů něco přes 4500. Uvedené čísla i hodnoty z průběhu jsou uvedené pro olověný akumulátor. Hodnoty se budou podle použité technologie lišit. Z uvedeného grafu je zřejmé, že bychom neměli akumulátory vybíjet na jejich spodní hranici.

Spodní hranicí rozumíme úroveň nabití, tedy SoC kdy by vybití akumulátoru pod tuto úroveň mělo destruktivní následky na elektrody akumulátoru a mohlo by dojít až k jeho

zničení. Takováto úroveň je obvykle označována jako tzv „cut-off“ napětí a například pro olověný akumulátor je to cca 20% SoC. Pro lithium-iontové akumulátory je tato hranice vyšší, až 50% SoC. Podle použitého materiálu elektrod a chemii elektrolytu musíme počítat s různě velkým „Cut-off“ napětí. Tento parametr je při analýze, návrhu nebo používání akumulátorů velmi důležitý aspekt, který nemůžeme přehlédnout. Při realizaci nabíjecích stanic je důležité dopředu tento parametr znát. Zpravidla ho uvádí výrobce ve svém datasheetu.

Ať už uvažujeme stáří článku nebo jeho zatížení počtem cyklů, článek vždy ztrácí kapacitu díky zvětšení svého vnitřního odporu  $R_i$ . Jak rychle se bude odpor měnit, bude záviset na čase, počtu cyklů ale především na teplotě, při které je článek provozován.

Na Obrázku 6: Vnitřní odpor v závislosti na stáří a teplotě [6] je zobrazeno, jak se mění vnitřní odpor článku v závislosti na čase. Konkrétně je rozdělen na šestiny roku. Jednotlivé křivky ukazují, jak dochází k nárůstu odporu díky teplotě při které článek provozujeme. Z průběhu je patrné, že provoz při nižších teplotách jako je 30°C nebo 40°C zvětšuje vnitřní odpor nepatrně oproti provozování článku při teplotě 55°C, kdy je nárůst až 1,3x. Uvedené teploty jsou měřené přímo na článku. Relativní odpor je relativní veličina. Je to tedy podíl původního vnitřního odporu a nového vnitřního odporu, který se zvětšil v závislosti času a teploty.



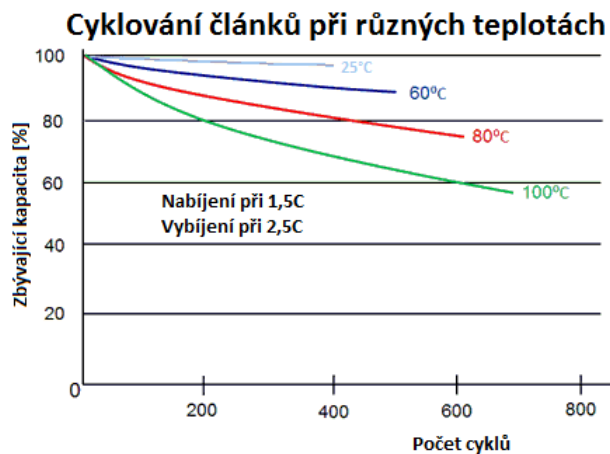
Obrázek 6: Vnitřní odpor v závislosti na stáří a teplotě [6]

Při nabíjení i vybíjení akumulátorů pracujeme s různými proudy. Čím větší proud, tím je článek více zahříván a tím také rychleji degraduje (respektive zvyšuje svůj vnitřní odpor). Článek degraduje, snižuje svou kapacitu, na základě počtu cyklů, které byli již na akumulátoru provedeny. Na Obrázku 7: Závislost počtu cyklů na kapacitě a teplotě [7] je zobrazena závislost

změny kapacity na počtu cyklů při různých teplotách. Obrázek zobrazuje změnu kapacity testovaného článku při nabíjení 1,5C a vybíjení 2,5C.

Zpravidla totiž neuvádíme přímo hodnoty proudu, kterým článek vybíjíme, ale uvádíme poměrnou hodnotu vztaženou k jeho kapacitě. Budeme-li se bavit o článku s kapacitou 2500 mAh, znamená to, že článek je schopen dodávat 2,5 A/hodinu. Pokud potom tedy uvedeme, že článek budeme vybit 2C, znamená to, že článek bude do zátěže dodávat 5A. Hodnoty pro vybíjení článku bývají zpravidla větší než hodnoty pro jeho nabíjení. Poměrné hodnoty vztažené ke kapacitě nám zároveň slouží k porovnání jednotlivých článků mezi sebou. Na Obrázku 7: Závislost počtu cyklů na kapacitě a teplotě [7] při nabíjení 1,5C a vybíjení 2,5C vidíme, že článek mění svou kapacitu už po prvních 200 cyklech. Rozhodujícím faktorem pro zmenšení kapacity je teplota, při které je článek nabíjen a vybíjen.

Hodnoty vybíjecích a nabíjecích proudů budou totiž ovlivňovat teplotu článku. Proto je důležité dbát na to, abychom článek nabíjeli vždy pomocí správné nabíječky. Například nabíjení baterie mobilního telefonu pomocí nabíječky pro tablet, která je schopna dodávat dvojnásobný proud, se nedoporučuje.



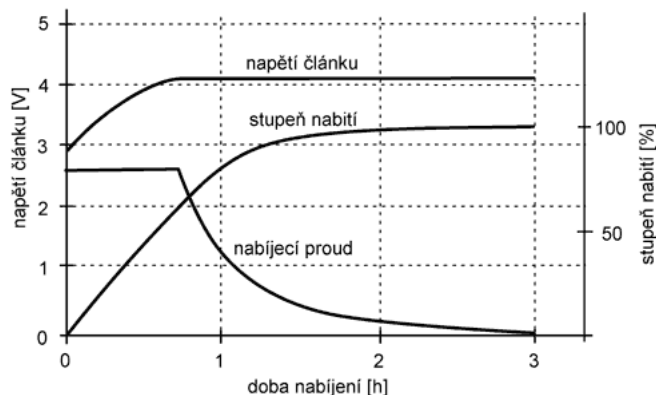
Obrázek 7: Závislost počtu cyklů na kapacitě a teplotě [7]

Před použitím baterií na sestavení „akupacku“ je důležité je otestovat, abychom zjistili kromě jiných parametrů i jejich životnost. Jedním z faktorů je vliv jejich používání na kapacitu. Pokud chceme optimálně využít akumulátory pro konkrétní aplikaci, musíme počítat se zahříváním článků kvůli procházejícímu proudu, degradace stářím vlivem neustálé reakce mezi elektrolytem a elektrodami a počtem cyklů (počet nabití a vybití článku). Pro výkonové aplikace musíme navrhnout vhodný systém chlazení, který může být pasivní nebo aktivní. V ideálním případě provést testy cyklováním a rozhodnout, které články jsou a které nejsou vhodné pro rekuperaci energie. Degradace stářím je aspekt, který nejsme schopni ovlivnit, můžeme pouze

vsadit na reklamu výrobce nebo osobní zkušenosti. Neměli bychom zapomenout při návrhu „akupacku“ počítat s výměnou a vyrobit „akupack“ lehce vyměnitelný.

Další faktory, které budou ovlivňovat životnost článků, respektive celého „akupacku“ jsou například přebíjení, podbíjení a tepelná kapacita baterie. Nabíjení každého akumulátoru probíhá od nulového napětí (respektive od cut-off napětí, nenulové SoC) s maximálním konstantním proudem. V počátku nabíjení prochází článkem konstantní proud. Procházející proud způsobuje logaritmický nárůst napětí. Tento jev trvá do doby než je napětí článku ustálené na konstantní hodnotě. V tomto čase začne proud článkem exponenciálně klesat. Proud klesá téměř do nuly než je článek plně nabitý (SoC je tedy 100%). Zde je patrné, že nemůžeme určit množství uložené energie v článku pouhým změřením napětí. Průběh nabíjení je zobrazen na Obrázku 8: Nabíjení článku [8].

Chování článku při nabíjení a vybíjení je důležité při návrhu testování z pohledu měřícího zařízení, které pracuje s článkem stejně jako nabíjecí stanice. V případě testování cyklováním měřící zařízení článek nabíjí a vybíjí a přes zpětnou vazbu měří parametry článku. Je důležité vzít v potaz „cut-off“ napětí, teplotu při nabíjení a regulaci nabíjecího nebo vybíjecího proudu.



Obrázek 8: Nabíjení článku [8]

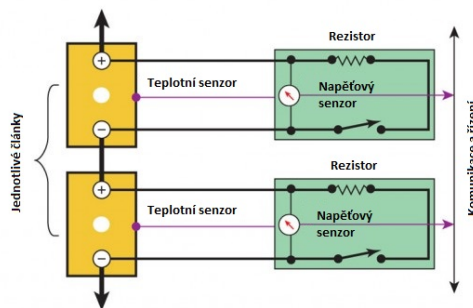
Stupeň nabití, anglicky SOC – State Of Charge se uvádí pro akupacky (i bateriové články) jako popis, kolik energie obsahují.

Pokud vytvoříme „akupack“ a začneme ho nabíjet, bude podle teorie elektrických obvodů všemi sériově spojenými články procházet stejně velký proud a na všech paralelních větvích bude stejný úbytek napětí. Takovéto podmínky nastanou pouze v případě, že všechny články jsou ideálními zdroji napětí nebo proudu a zároveň zanedbáme odpor propojení. Ve skutečnosti ale žádný článek není ideálním zdrojem elektrické energie a nemůžeme zanedbávat odpor propojení. Každý výrobce vyrobí každý článek s lehce odlišným vnitřním odporem a s každým propojem se odpor lehce změní. Důsledkem toho se pak každý článek bude nabíjet

jiným proudem. Jeden rychleji, druhý pomaleji a to patří mezi nežádoucí vlivy. Každý článek se bude různě zahřívat a v důsledku toho měnit svůj vnitřní odpor, čímž se od ostatních článků začne ještě více lišit. Pokud ze tří článků nabijeme například vždy ten první na maximum, většinu napětí celého „akupacku“ nese právě on, včetně proudové zatížitelnosti. První článek pak bude mít kratší životnost oproti ostatním, což vede k degradaci celého „akupacku“.

Z tohoto důvodu je většinou nabíjení „akupacku“ digitálně řízeno pomocí Řídicího systému baterií tzv. BMS – Battery management system. BMS jsou měřicí a řídicí obvody, které měří SOC článků, teploty, napětí, proudy a zda jsou všechny články v pořádku a funkční. BMS využíváme pro zvyšování bezpečnosti a životnosti používaných „akupacků“. Bezpečnost zvyšujeme především měřením napětí a proudů – pokud by veličina přesáhla určitou hodnotu, BMS je schopno články odpojit, vypnout nabíjení nebo poslat informaci po komunikační sběrnici nabíječe nebo spotřebiči, aby upravil své chování. Životnost pomocí BMS zvyšujeme v první řadě při nabíjení, kde je hlídáno napětí každého článku a BMS umí postupně rozdělovat nabíjecí proud pro jednotlivé články tak, aby bylo napětí co nejlépe rozloženo a nedocházelo pak k přebíjení už nabitých článků nebo podbíjení těch méně nabitých. BMS dokáže hlídat teploty v „akupacku“ a na základě toho efektivně využívat chladicí systém. Zjednodušené blokové schéma BMS je na Obrázku 9: BMS - Řídicí systém baterií [9].

## Battery Management System (BMS)



Obrázek 9: BMS - Řídicí systém baterií [9]

Baterie potřebujeme testovat z hlediska jejich životnosti. Životnost můžeme zvýšit tím, že nebudeme články zbytečně zatěžovat, budeme je méně cyklovat, snížíme hloubku vybíjení nebo je budeme provozovat při nižších prouděch než jsou jejich maxima. Životnost můžeme zvýšit i při správném nabíjení, které zajistíme díky správnému návrhu BMS. Pokud ale budeme navrhovat systém v automotive, armádě nebo letectví musíme uvažovat používání článků na hraničních hodnotách. Abychom byli schopni zajistit stabilitu našeho návrhu a zároveň dlouhou životnost musíme znát chování článku v jeho krajních hodnotách. Z toho důvodu musíme články testovat. Jakým způsobem lze články testovat nám předepisují normy.

### 3.2 NORMY PRO BATERIE [10]

Normy pro baterie rozdělujeme do několika podskupin. Existují obecné normy, normy podle použitých chemikálií a materiálů, bezpečnostní normy, automotive normy, aerospace, v armádních zařízeních, existují normy pro software, který je používán v BMS, EMC normy a normy pro standardy kvality.

Každá norma vždy začíná krátkou zkratkou, kterou vyjadřuje pro jaký stát (případně kdo ji schvaluje) je daná norma napsána. Nejznámější jsou ČSN (nemá vysvětlení zkratky, pouze neoficiálně Česká soustava norem), ISO (International Standards Organisation), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), IEC (International Electrotechnical Commission), EN (European Standards) a CE (Conformance with EU directives). Zkratek je velké množství, ale výše uvedené jsou důležité pro Evropu, nebo nejznámější a nejpoužívanější. Důležité normy jsou uvedené v Tabulce 2: Důležité standardy.

Označení standardu	Název	Zařazení
IEC 60086-2, BS	Baterie - Obecné	Obecný standard
ANSI C18.2M	Přenosné nabíjecí články a baterie - Obecné standardy a specifikace	Obecný standard
UL 2054	Bezpečnost komerčních i domácích baterií - Testování	Obecný standard
IEC 61508	Požadavky IEC pro bezpečný provoz elektrických, elektronických, programovatelných zařízení	Bezpečnostní standard
IEC 61982-1	Sekundární články pro elektrická vozidla - testování	Automotive standard
SAE J240	Testování životnosti baterií pro automobilový průmysl	Automotive standard
ECE 100	Konstrukční a funkční bezpečnost pro baterie pro elektrická vozidla	Automotive standard
DEF STAN 59-41	Elektromagnetická kompatibilita	Armádní standard

Tabulka 2: Důležité standardy



- První norma IEC 60086-6, BS pojednává obecně o bateriích. Specifikuje co to je baterie, jakým způsobem by se měli provádět testy při vybíjení článků. Tento standard je především pro uživatele baterií, vývojáře zařízení a výrobní průmysl. Standard pojednává o užívání a výrobě primárních článků.
- Druhá norma ANSI C18.2M, je americký standard, který se zabývá přenosnými články a bateriemi. Specifikuje obecně sekundární články.
- Další normou je UL 2054, která udává požadavky pro baterie jak primárních tak sekundárních článků a to hlavně pro jejich bezpečnost. Standard obsahuje testy pro baterie a články, které by měl každý článek splňovat.
- Standard IEC 61508 je obecný standard, který udává, jak se zjišťuje bezpečnost článku. Lze využít pro všechny typy aplikací – je to univerzální norma.
- Norma IEC 61982-1 specifikuje hodnoty parametrů jako je napětí, proud, výkon nebo teplota, které se měří při testování článků, specificky pro články a baterie využívané pro elektrické pohony, především v elektrických vozidlech. Norma zároveň popisuje testy, i jakým způsobem články testovat.
- SAE J240 je standard, který pojednává o testování životnosti článků a baterií pro automobilový průmysl.
- ECE 100 je norma především pro výrobce baterií, článků a celých „akupacků“ pro automobilový průmysl.
- Poslední zmíněná norma DEF STAN 59-41, popisuje využití článků v zařízení, kde se musí dbát na elektromagnetickou kompatibilitu.

Obecně existuje mnohem více standardů. Od norem popisujících výrobu, testování až po aplikaci. Tabulka 2: Důležité standardy udává pouze výčet norem, které obecně popisují baterii, článek, určují bezpečnost článku, popisují testování, normy pro automotive a jedna norma (konkrétně Armádní standard DEF, které patří mezi nejpřísnější) udává zásady EMC. Obecně neplatí, že by zařízení museli normy splňovat (i zde existují výjimky) ale v případě problému pak dodavatel, výrobce nebo vývojář nese plnou odpovědnost za případné problémy a nemůže se odvolat na normu podle které bylo jeho zařízení testováno.

### 3.3 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ BATERIOVÝCH ČLÁNKŮ [4]

V úvodu kapitoly jsme si uvedli, že články je důležité testovat z důvodu zjištění jejich životnosti. Jakým způsobem a co bychom měli při testování dodržovat, nám udávají standardy, které jsme již také zmínili. Důvod testování článků je mimo jiné důležité z hlediska zjištění parametrů pro správné sestavení „akupacku“ vhodného pro naši aplikaci.

Dalšími důvody proč články testovat mohou být důležité informace jako kolik energie v akumulátoru ještě zbývá (zjistíme SoC), jaký čas můžeme zařízení na baterii provozovat při zachování konstantního odběru proudu, jak velký elektromagnetický šum je důsledkem použití baterie v aplikaci nebo zda je bezpečné provozování článků v konkrétní aplikaci. A další informace o stavu článků, respektive baterií, lze získat různými způsoby testování. Obecně lze v měření použít metodu přímého a nepřímého měření. V mnoha případech testování článků zjišťujeme stav baterie pomocí nepřímého testování.

### 3.3.1 NEPŘÍMÉ TESTOVÁNÍ

Protože nemůžeme vždy článek změřit přímo využíváme metod nepřímého měření. Například změřit kolik energie ještě v článku zbývá (SOC – stupeň nabití viz. Obrázek 8: Nabíjení článku [8]). Pomocí přímých metod měření baterii vybijeme, měříme čas a následně ho porovnáme s časem pro vybití celého článku. Přímá metoda tady ale nehraje správnou roli, jelikož takové měření zabere spoustu času a zkracuje životnost baterie (každý cyklus zvyšuje vnitřní odpor baterie). Navíc tento způsob měření nemá smysl pro primární články, které již znovu nenabijeme. Každý článek se bude chovat trochu odlišně a my pak nezjistíme adekvátní hodnoty. Proto je nutné použít nepřímé měření. Obdobně pokud se snažíme vyhodnotit stav životnosti sekundárních článků, tedy SoH – State of Health. S přímým měřením musíme článek nabít a vybit tolikrát, než ho úplně zničíme. Přímá metoda tak není úplně šetrná, pokud nemáme k dispozici články navíc. A i v případě rezervního článku nemusíme získat správné hodnoty. Proto použijeme nepřímé testování.

### 3.3.2 TESTOVÁNÍ KVALITY

Testování kvality je seznam testů, kdy je vytvořený návrh článku nebo „akupacku“ vystaven podmínkám pro provoz na hranicích jeho možností. Z těchto testů se odvíjí následně limitní hodnoty a kritéria pro použití i provoz článku nebo „akupacku“. Článek nebo „akupack“ je v těchto testech vystaven vysokým i nízkým teplotám, nabíjí se a vybíjí v limitních hranicích proudů a je možné baterii zničit. Zároveň jsou zde prováděny testy nabíječek pro různé „akupacky“ a následně jsou vyhodnocována pravidla pro vhodné používání testovaných nabíječek.

Základními a také prvními testy jsou testy bezpečnosti. Bezpečnostní testy jsou asi nejrozsáhlejší, jelikož je můžeme rozdělit na testování pláště článku, resp. obalu „akupacku“, ochrany z pohledu zkratových proudů kde nás zajímá vzniklé teplo, přebíjení a vznik vysokých teplot a další. Mezi bezpečnostní testy patří i testování článků pod zátěží. Patří sem dva základní testy, které testují článek z mechanické stránky a také vliv článku na životní prostředí.

Dále je třeba uvést, že pro aplikace jako medicínská zařízení, zařízení v letectví nebo armádní systémy existuje speciální skupina testů, které jsou například popsány a udávány ve standardech s předponou DEF.

Dále se provádí kalorimetrické testy, kde se zjišťuje množství tepla, které článek generuje při nabíjení a vybíjení. Článek se nabije uzavřen v nějaké izolaci (může být ve skelné vatě) a následně se vloží do vody, která má předem danou teplotu. Rozdíl teplot pak určuje množství generované tepelné energie článkem. Výsledný vztah vyjádříme podle kalorimetrické rovnice (8).

$$m_1 c_1 (t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t) \quad (8)$$

Kde levá strana odpovídá hmotnosti vody  $m$ , měrné tepelné kapacitě vody  $c = 4,2 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  a rozdílu teploty vody před a po vložení článku. Pravá strana adekvátně odpovídá hodnotám článku. Z tohoto vztahu jsme tak schopni určit měrnou tepelnou kapacitu podle vztahu (9).

$$c_2 = \frac{m_1 c_1 (t - t_1)}{m_2 (t_2 - t)} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (9)$$

Pro zjištění rozložení generovaného tepla článku a pak jeho následné správné umístění v „akupacku“ se používá metoda zobrazování tepelného spektra (angl. Thermal imaging). Pomocí termální kamery se sleduje článek a hledají se místa, které vykazují největší výdej tepla. Tuto metodu lze provádět dvojím způsobem. Pokud zjišťujeme aktuální stav článku a zkoumáme například vliv zkratového proudu na článek sledujeme článek pomocí termální kamery a vyhodnocujeme následky z aktuálního stavu. Pokud chceme znát dlouhodobější vliv protékajícího proudu při různých zátěžích je vhodnější sledovaná data ukládat ve formě videa nebo obrázků a vyhodnocovat chování článku zpětně. U obou metod je důležité aby se ho účastnila nějaká osoba aspoň jako dohled, protože článek se může vlivem vysokých teplot vznítit.

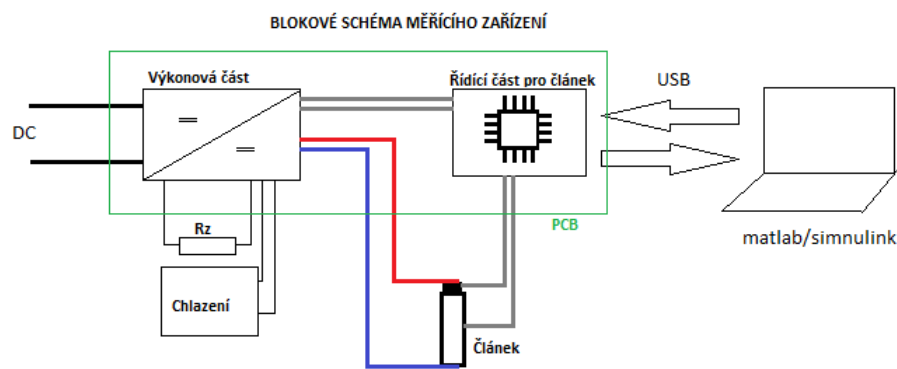
Články se samozřejmě podrobují testům EMC (Electro Magnetic Compatibility) tedy testy Elektromagnetické kompatibility. Většinu testování nebo postupů je popsáno v normách pro testování EMC. Základním pravidlem pro splnění EMC kritérií je, že zařízení, v našem případě tedy článek, nesmí rušit žádné zařízení okolo a zároveň nesmí být rušeno. Z hlediska EMC testů budeme mluvit spíše o testování „akupacků“ než jednotlivých článků.

Dalším důležitým testem je testování článku při zátěži. Výsledkem testu je ověření, že výsledný „akupack“ nebo článek je schopen dodávat energii po určitou dobu, podle aplikace na kterou byl navržen. Zátěž je vždy vytvořena aby co nejvíce odpovídala zátěži, kterou bude článek nebo „akupack“ ve skutečnosti napájet. Pro mobilní telefon bude stačit článek zatěžovat činným odporem, zatímco u „akupacků“ pro automobilový průmysl bude lepší „akupack“ zatěžovat přímo motorem, resp. induktivní zátěží.

Jedním z dalších testů je cyklické zatěžování článku. Tento test je jeden z nejdůležitějších testů kvality vůbec. Články jsou cyklicky zatěžovány, to znamená, že jsou nabíjeny a vybíjeny pro ověření životnosti článku, kterou uvádí výrobce. Životnost udána cyklováním je počet cyklů než článek ztratí 20% své nominální kapacity. Mimo testování pro ověření informace co udává výrobce je test velice důležitý pro zjištění vlastností a chování pro konečný produkt kde

má být článěk použit. Při cyklickém zatěžování článku můžeme zároveň provést řadu dalších testů jako kalorimetrické měření (následně použit výpočty z rovnic (8) a (9)), zahřívání při vybíjení a tím rovnou i DoD (Obrázek 5: DoD - Hloubka vybíjení [5]) a další parametry. Tyto testy jsou však časově velmi náročné už z hlediska počtu cyklů, které článěk musí podstoupit. Pro tyto testy je vhodné použít měřicí zařízení, které je schopno automaticky článěk cyklovat a zároveň měřit potřebné parametry.

Měřicí zařízení pro cyklování článků bude složeno z výkonové a řídicí části. Řídicí část je možné složit jako analogovou, což je náročnější pro vytvoření desky plošného spoje, nebo jako digitální, kde jsou cykly řízeny pomocí MCU. Druhá varianta je zas náročnější na vytvoření řídicího SW. Příklad takového zařízení je blokově zobrazen na Obrázku 10: Blokové schéma měřicího zařízení pro cyklování článků.



Obrázek 10: Blokové schéma měřicího zařízení pro cyklování článků

Zařízení na obrázku 10 se skládá z výkonové a řídicí části. Celý systém je napájen ze stejnosměrného napětí, protože i článěk pracuje se stejnosměrným napětím. Není nutné tedy do obvodu zakreslovat usměrňovač ze střídavé sítě. Můžeme uvažovat napájení ze zdroje, protože uvažujeme práci v laboratorních podmínkách. Pro komerční využití by bylo vhodnější použít napájení ze střídavé sítě a navrhnout pak jednoduchý usměrňovač. Výkonová i řídicí část jsou v tomto případě součástí jedné desky plošného spoje (angl. PCB - Printed Circuit Board).

Výkonová část zajišťuje přenos potřebné energie pro nabíjení článku a zároveň jsou zde umístěny zdroje pro převod na různé úrovně napětí pro měřicí a řídicí systémy. K výkonové části je připojena zátěž  $R_Z$ , která slouží pro vybíjení článků a zároveň také chlazení, které chladí celou výkonovou část včetně zátěže při cyklování článku. Součástí této části je ještě zdroj napětí, který vytváří nabíjecí proud pro článěk. Nejčastěji se jedná o můstkové zapojení výkonových součástek, v tomto případě spínaných pomocí mikroprocesoru.

Řídicí část se stará o řízení nabíjení, tedy o spínání výkonových prvků a zároveň měří parametry článku, které používá jednak pro vyhodnocování chyby a za druhé je odesílá pomocí

komunikačního rozhraní, například USB do počítače nebo jiné jednotky, která je schopna uchovávat data, například datalogeru s flash pamětí nebo vyjímatelnou datovou kartou.

## 4 NÁVRH TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Cílem testovacího zařízení je ulehčit práci při analýze článků používaných v „akupacku“ používaného v elektrické formuli. Zejména je důležité znát chování článků při cyklické zátěži, pod kterou se články často dostávají vlivem jízdy. Jak je uvedeno v kapitole TESTOVÁNÍ KVALITY při cyklickém zatěžování je možné měřit více parametrů jako kalorimetrická měření, měření teplotního spektra článku při zátěži nebo například hloubku vybíjení a její vliv na změnu kapacity. Primárním úkolem zařízení je však provádět cyklickou zátěž a uchovávat data pro pozdější zpracování a vyvození závěru.

Celý koncept návrhu měřícího zařízení rozdělíme do dvou částí. V první části se budeme zabývat návrhem hardwarové části zařízení jako je návrh schématu, návrh desky plošného spoje, způsob chlazení nebo mobilita. V druhé části budeme rozebírat vývoj softwarové části jako je řízení cyklování, měření parametrů a komunikace s počítačem.

### 4.1 HARDWARE [14]

Cílem návrhu hardwarové části, je vytvořit zařízení, které je schopné provádět cyklické zatěžování a zároveň se jedná o jednoduše přenosné zařízení. Lze se ubírat dvěma cestami. Prvním způsobem je vytvořit zařízení, které bude fyzicky umístěné na jednom místě, ideálně připojené k napájecí síti budovy a bude tak jeho místo vždy určené. Jiným způsobem je navrhnout zařízení, které nebude mít stálou polohu. Přenosné zařízení má několik výhod ale i nevýhod.

Nevýhodou přenosného zařízení je, že se k němu neustále musí někde přivádět nějaký další zdroj elektrické energie, který bude schopen poskytnout dost energie pro nabíjení článku. Další nevýhodou je, že musíme brát v potaz rozměry zařízení. Z tohoto pohledu nemůžeme zařízení dimenzovat pro velké výkony. Na druhou stranu výhodou přenosného zařízení je jeho mobilita. Nemusíme mít přístup do jedné místnosti, měření můžeme provádět na více místech podle našeho uvážení což oceníme především pokud nepracujeme každý den v jedné laboratoři ale pohybujeme se. Další výhodou přenosnosti je možnost, že si jednoduše zařízení můžou předávat lidé mezi sebou což se hodí zejména při práci v týmu. Nemůžeme opomenout, že díky mobilitě zařízení je jednodušší provádět servis, protože zařízení jednoduše přeneseme k jeho výrobcí. Zařízení vyvíjené v této práci je navrženo jako přenosné. Zejména z důvodu jeho používání celým týmem elektrické formule kde je delegace práce na denním pořádku a přesun zařízení přijde vhod.

Takže prvním krokem ve vývoji měřícího přístroje pro cyklické zatěžování je vytvořit schéma elektrického zapojení. Jedná se o schéma elektrických součástek, které jsou spojené, aby tvořili systém, který umožní nabíjet a vybíjet článek a zároveň měřit jeho parametry. Návrh schématu

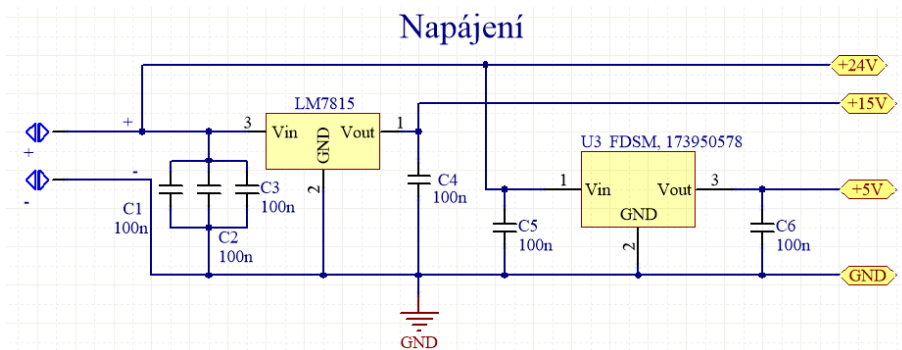
obnáší i vyhledávání vhodných elektrických součástek, které potřebujeme použít. Z elektrického schématu je vytvořena deska plošných spojů (angl. PCB - Printed Circuit Board). Při tvorbě PCB je důležité zohlednit faktory jako vyrobiteľnosť, funkčnost ale hlavně dát dôraz na dimenzování samotné desky, rozmístění součástek na desce a elektromechaniku jako je návrh použitých konektorů a nebo způsob připojení napájení přístroje nebo článku. Při dimenzování je nutné zohlednit způsob chlazení. Z toho důvodu se často stává, že se při rozmístění součástek musí stále upravovat elektrické schéma.

#### 4.1.1 ELEKTRICKÉ SCHÉMA

Pro vývoj elektrického schématu byl použit profesionální software Altium Designer. Software disponuje širokou podporou knihoven pro nejrůznější součástky a umožňuje tak například 3D zobrazení. Altium Designer dále umožňuje tvorbu elektrického schématu, tvorbu PCB, generování 3D modelu, generování seznamu součástek, přímý přístup k objednávání přímo ze zadaných světových internetových obchodů nebo generování souborů potřebné pro výrobce PCB.

Schéma je fyzicky rozděleno do dvou částí. První část, která řeší napájení celého přístroje a části, která se stará o cyklování, měření parametrů a komunikace s MCU (mikroprocesorová jednotka angl. Microcontroller unit).

Napájecí část zobrazuje Obrázek 11 Napájecí část měřícího zařízení.

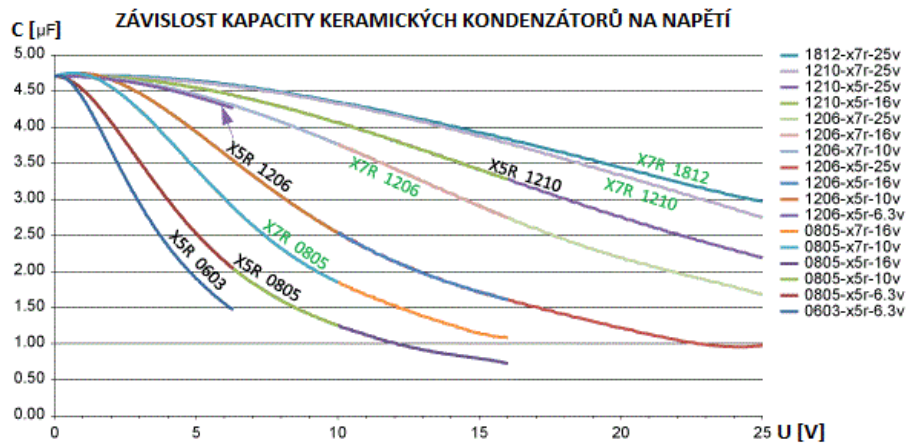


Obrázek 11: Napájecí část měřícího zařízení

Celý přístroj je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí, které je přivedeno na svorky „+“ a „-“. Vstupní napájecí napětí je +24V DC (angl. DC = Direct Current - stejnosměrný proud), protože se jedná o bezpečně nízké napětí. Jedna cesta z kladné svorky pokračuje až k nabíjení baterie. Druhá cesta je připojena ke vstupu do lineárního regulátoru LM7815 přes paralelní kombinace kondenzátorů připojených k záporné vstupní svorce (záporná vstupní svorka slouží jako společný uzel, který označíme GND z angl. Ground = zem). Kondenzátory C1, C2 a C3 slouží především jako kompenzátory vstupního napětí pro regulátor LM7815. V případě, kdy

by napětí na vstupu regulátoru začalo kolísat a vstup by nebyl ošetřen kapacitou tvořenou z kondenzátorů C1, C2 a C3 došlo by k velkému zatěžování samotného regulátoru, který by se snažil udržet na výstupu stálých +15V DC. Takže vstupní kapacita ulehčuje regulaci a dochází pak k pomalejší degradaci součástky. Výstup regulátoru je ošetřen kapacitou C4, která pomáhá udržet stabilní výstup a odlehčuje tak práci regulátoru. Ze stejných důvodů jsou připojeny kondenzátory C5 a C6 na vstup a výstup lineárního zdroje U3, který upravuje vstupní napětí z +24V na +5V. Při dimenzování kapacit kondenzátorů je důležité vzít v potaz o jaké kondenzátory se jedná.

Základním rozdělením pro kondenzátory a vlastně pro elektrotechnické součástky je jejich způsob montáže na PCB. Buď skrz desku, tzv. THT (angl. Trough-Hole Technology) nebo povrchová montáž neboli SMT (angl. Surface Mount Technology). Z důvodu použití 2-vrstvé PCB byla zvolena technologie SMT a pouze pro výjimečné prvky THT. Pokud se bavíme o konkrétních součástkách bavíme se o tzv. SMD (angl. Surface Mount Device). Kondenzátory se obecně vyrábí z různým dielektrikem. Od dielektrika z keramiky, přes směsi tantalu nebo dalších. Konkrétně pro výše zmíněné kondenzátory (C1 - C6), kondenzátory blokovací, se používají kondenzátory z keramickým dielektrikem. Jedná se o kondenzátory typu MLCC, z anglické zkratky Multi Layer Ceramic Condesator, tedy multi-vrstvé keramické kondenzátory. Používáme SMD MLCC kondenzátory, u který je kapacita různě závislá na napětí, a mění se podle použité keramiky a hlavně podle velikosti pouzdra součástky. Obrázek 12: Závislost kapacity keramických kondenzátorů na napětí [11] zobrazuje pokles kapacity vlivem vyššího napětí pro keramiky X5R a X7R a různá pouzdra. Podle tohoto předpokladu jsou dimenzovány vstupní kondenzátory na napětí vyšší než téměř dvojnásobek vstupního napětí +24V, tedy na 50V, keramiku X7R a použitá pouzdra jsou 0805. Tato konfigurace zajistí, že snížení kapacity nebude mít významný vliv na funkci kondenzátorů.



Obrázek 12: Závislost kapacity keramických kondenzátorů na napětí [11]

Dalším důležitým aspektem při návrhu schématu byl výběr lineárních regulátorů, respektive zdrojů. Součástka LM7815 je lineární zdroj, který mění napětí ze vstupních +24V na +15V. Vytváří napájecí napětí pro součástku U2, tzv. „Gate-Driver“, který popíšeme později. Při návrhu bylo důležité vycházet z katalogových hodnot. Podle katalogového listu (Datasheet Napěťový regulátor LM7815 - „datasheet\_LM7815.pdf“) je zdroj LM7815 schopen regulovat napětí a dodávat přitom proud až 1A. Potřebný proud, který chceme aby zdroj dodával spočítáme jednoduše sečtením spotřeby všech spotřebičů (v tomto případě součástek), které ze zdroje napájíme. V našem případě se jedná pouze o jednu součástku U2, která podle svého katalogového listu nedosáhne spotřeby vyšší než jednotek mA. Z tohoto důvodu není nutné přemýšlet nad chladicím systémem pro zdroj LM7815, protože se zdroj nedostane ani na polovinu svého výkonu a jako pouzdro může být použito klasické TO-220. Pouzdro TO-220 má výhodu v jeho velikosti, protože nezabírá mnoho místa a zároveň je připravené pro pozdější připojení pasivního chlazení.

Dalším zdrojem napětí je součástka U3, celým názvem MagI3C Power Module FDSM - Fixed Step Down Module (Datasheet Napěťový regulátor FDSM Magic - „datasheet\_FDSM.pdf“). Tento výkonový modul je schopen ze vstupního napětí pohybující se v širokém rozmezí +6V až +28V vytvořit stabilních +5V nebo +3,3V. V případě měřicího zařízení je použit modul, který reguluje výstupní napětí na +5V. Snížené napětí +5V je použito pro napájení součástek, které provádějí měření, nebo upravují naměřené hodnoty pro měření pomocí MCU, který má svá určitá omezení.

Zdroj U3 napájí pět operačních zesilovačů používaných pro úpravu měřených hodnot jako je teplota pomocí NTC článku, vstupního napětí pro nabíjení, napětí na článku, nabíjecí a vybíjecí proud. Napětí +5V slouží také k napájení proudového čidla. Podle katalogového listu výrobce je modul U3 schopen dodávat proud až několik jednotek ampér, konkrétně při vstupních +12V je možný typický výstup kolem 3,5A. Celková spotřeba napájených součástek je dána součtem maximální spotřeby. Pro napájení jednoho operačního zesilovače typu LM358A je potřeba maximálně 1,2 mA a pro napájení proudového čidla ACS712 je potřeba maximálně 13 mA. Výsledný proud, který bude modul U3 do obvodu dodávat spočítáme podle rovnice (10).

$$I_{OUT} = 5 \cdot 1,2 + 13 = 19 [mA] \quad (10)$$

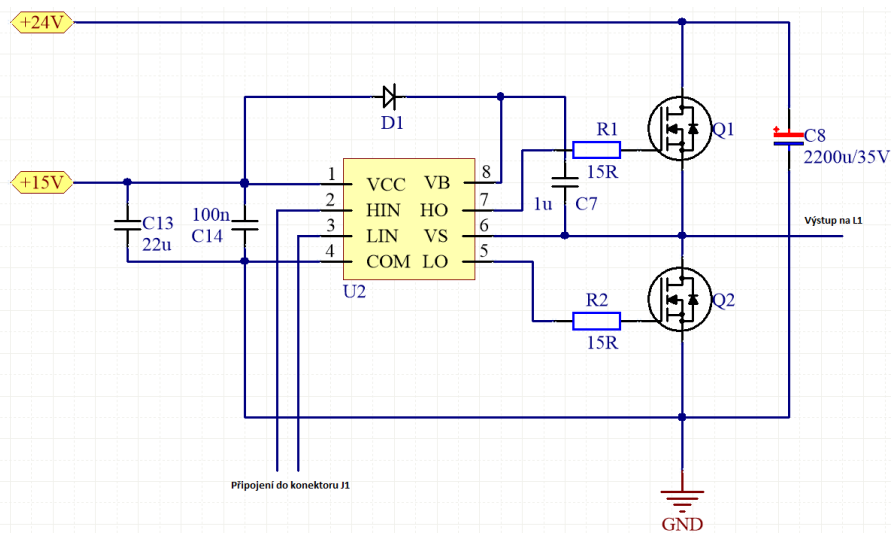
Celkem je spotřeba pro součástky napájené na +5V necelých 20 mA. Protože je modul napájen více než +12V je jeho výstupní proud v řádu jednotek A. To znamená, že jeho výstupní výkon bez problému pokryje spotřebu obvodu bez jakýchkoliv tepelných ztrát a není tedy nutné navrhovat chladicí systém.



Další částí obvodu je výkonový polo-můstek složený ze dvou tranzistorů (Q1 a Q2) typu N-MOSFet (N = oblast vnitřního polovodičového přechodu, která je řízena gate elektrodou; MOSFet z angl. Metal Oxide Semiconductor Field effect transistor) s indukovaným kanálem. Obecný princip fungování tranzistoru vyplývá z jeho názvu. MOSFet, neboli polem řízený tranzistor, je elektronická součástka, která předně plní funkci spínače nebo zesilovače. Funkci spínače plní v případě, kdy je přiloženo napětí  $U_{gs}$  mezi elektrody gate a source. Při přivedení napětí  $U_{gs}$  je tranzistor typu N sepnut, polovodičový přechod je zaplněn nábojem a tranzistorem prochází proud. Pokud napětí odebereme nebo snížíme na nulu odstraníme z polovodičového přechodu náboj a tranzistor přestane propouštět proud. Vlastnost tranzistoru je využita v polo-můstku, který zajišťuje nabíjení článku. Polo-můstek je řízený z tzv. gate-driveru U2, který zajišťuje spínání gate elektrod jednotlivých tranzistorů na základě PWM signálu (angl. Pulse Width Modulation - Pulsně šířková modulace).

Gate-driver U2 je napájený ze zdroje +15V kde jsou připojeny blokovací keramické kondenzátory C13 a C14 mezi napájením na pin 1 a GND na pin 4 součástky U2. PWM signál je generovaný z mikroprocesoru, který je k desce připojen přes konektor J1 a oba dva PWM signály jsou připojeny k U2 na piny 2 a 3. Spínání polo-můstku vytváří mezi elektrodou source tranzistoru Q1 a elektrodou drain Q2 proměnný proud. Při přivedení kladného napětí na elektrodu gate tranzistoru Q1 začne tranzistorem procházet proud. Q2 je v tento okamžik vypnutý, neprochází jím žádný proud. Směr proudu je od elektrody source tranzistoru Q1 směrem na výstup pro cívkou L1.

V druhé fázi není napětí na gate elektrodu Q1 přivedeno a zároveň není sepnutý ani druhý tranzistor. Této fázi se říká tzv. death-time. Doba mezi odepnutím Q1 a sepnutím Q2 nazýváme „death-time“. Doba slouží k odvedení zbytkového náboje z elektrody gate a zaručuje se tím úplné vypnutí. Kdybychom sepnuli tranzistor Q2 hned po vypnutí Q1 mohl by zbytkový náboj na gate elektrodě Q1 způsobit proražení polovodičového přechodu tranzistoru a došlo by k velkému nárůstu proudu. Proud by se neustále zvětšoval a celý polo-můstek by se ocitl ve zkratu. Zkratový proud by pak způsobil proražení polovodičového přechodu druhého tranzistoru a na obou tranzistorech by bylo generováno velké teplo, důsledkem procházejícího proudu. Tento jev by byl pro obvod destruktivní. Při dodržení správného spínání a death-time je ve třetí fázi, kdy je odveden všechny zbytkový náboj z tranzistoru Q1 přivedeno kladné napětí na gate elektrodu tranzistoru Q2. Tranzistor je sepnutý a proud cívkou L1 začne klesat. Dodržení správného času mezi sepnutím druhého tranzistoru ale také správným časováním a frekvencí spínání je zajištěna správná funkčnost. Při nižších frekvencích spínání, v řádu  $10^0 - 10^3 Hz$ , dochází k velkému zvlnění výstupního proudu a systém pak generuje velké teplo. Naopak při vysokých frekvencích se začínají projevovat spínací ztráty. Měřicí zařízení je bezpečně spínat v řádu  $10^5 Hz$ . Opakováním těchto tří kroků je pak generován proměnný proud, který na cívkou L1 vytváří indukované napětí. Zapojení je na Obrázku 13: Řízení polo-můstku Q1 a Q2.



Obrázek 13: Řízení polo-můstku Q1 a Q2

Při výběru tranzistorů jsou důležitými faktory napětí mezi elektrodami drain a source, potom proud, který přes ně může procházet a vnitřní odpor polovodičového přechodu v sepnutém stavu. Tranzistory v zařízení jsou dimenzované na vysoké proudy až 50A, na napětí až 60V a pracují s vnitřním odporem maximálně 0,018  $\Omega$ . Vlivem vnitřního odporu  $R_{DS(on)}$  a procházejícím proudem je na tranzistoru generované teplo podle vztahu (11).

$$P = R_{DS(on)} I^2 [W] \quad (11)$$

Výkon podle vztahu (11) je pak generovaný tranzistorem ve formě tepla, které je potřeba odvést ze systému. Proto při návrhu je nutné počítat i se systémem chlazení. Při dimenzování chladicího systému je nutné zohledňovat jednak množství tepla, které je potřeba odstranit ale také prostředí, ve kterém se systém nebo zařízení nachází. Tepelný výkon můžeme analogicky přirovnat k elektrickému proudu, změnu teploty k napětí a tepelný odpor k odporu elektrickému. Tepelný výkon zařízení pak spočítáme podle vztahu (12), který je analogický k Ohmově zákonu.

$$P_T = \frac{\theta}{R_\theta} [W] \quad (12)$$

Kde  $\theta$  je změna teploty,  $R_\theta$  je tepelný odpor a  $P_T$  je výsledný tepelný výkon. Tepelný odpor je vlastnost přechodů mezi dvěma prostředími. V našem případě například z pouzdra součástky na chladič. Tento parametr lze snížit za použití tepelně vodivé pasty. Celkový výkon bude pak záviset na rozdílu teploty na součástce a v jejím okolí a také na součtu tepelných odporů všech přechodů. Zpravidla se jedná o přechod mezi součástkou a pouzdrem součástky, mezi pouzdrem a chladičem a pak mezi chladičem a okolím. Označíme tedy tepelný odpor

přechodu mezi součástí a pouzdrém jako  $R_{\theta_{dc}}$  (dolní index dc označuje směr přechodu, v tomto případě z angl. device to case), mezi pouzdrém a chladičem označíme odpor jako  $R_{\theta_{cr}}$  (z angl. case to radiator) a přechod z chladiče do okolí jako  $R_{\theta_{ra}}$  (z angl. radiator to area). Změnu teploty vyjádříme jako teplotu součástky  $\theta_d$  a teplotu okolí  $\theta_a$ . Výsledný tepelný výkon pak spočítáme podle vztahu (13).

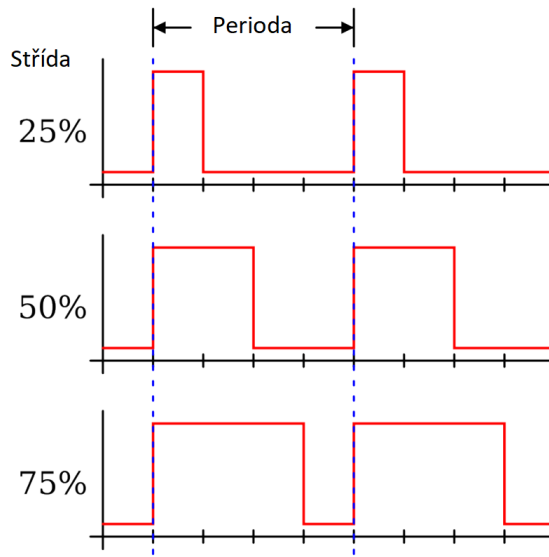
$$P_T = \frac{\theta_d - \theta_a}{R_{\theta_{dc}} + R_{\theta_{cr}} + R_{\theta_{ra}}} [W] \quad (13)$$

Z tohoto důvodu je nutné vybrat tranzistor, který je ve vhodném pouzdře, které dokáže co nejlépe odvádět teplo ale zároveň má co nejmenší rozměry, kvůli mobilitě celého zařízení. Tranzistory Q1 a Q2 jsou v pouzdře typu TO-220, které umožňuje připojit chladič pro pasivní chlazení. Výsledná efektivita odvodu tepla je zvýšena použitím tepelně vodivé pasty, která je nanášena mezi pouzdrém tranzistoru a chladičem, který je k němu připevněn. Z Obrázku 13: Řízení polo-můstku Q1 a Q2 je dalším důležitým prvkem v obvodu elektrolytický kondenzátor C8, který zaručuje stabilitu napětí, které je mezi vstupem +24V a GND. Kondenzátor vyrovnává napěťové špičky, které mohou být způsobeny spínáním tranzistorů a následným vznikem indukovaného napětí na cívce L1. Vznik napěťových špiček bude ovlivněn rychlostí změny proudu. Rychlost změny výstupního proudu z polo-můstku je úměrná frekvenci spínání. Pro toto zapojení je frekvence spínání  $100kHz$ . Při této velikosti frekvence spínání není systém tolik namáhán.

Spínáním polo-můstku lze měnit výstupní proud, který následně indukuje napětí na cívce L1. Velikost výstupního proudu bude záležet na době sepnutí a vypnutí obou tranzistorů. Výstupní proud lze měnit pomocí změny střídý PWM signálů, kterými je řízen gate-driver U2. Při PWM modulaci pracujeme s dvěma parametry. Jedním je frekvence, která určuje jakou rychlostí se řídicí signály budou měnit z hodnoty logické 0 na logickou 1 a naopak. Druhým parametrem je střída, která udává poměr mezi dobou sepnutí, tedy dobou kdy je PWM signál ve stavu logické 1 a periodou celého signálu. Střída  $D$  (z angl. Duty cycle) je zpravidla zobrazována v procentech a udává ji vztah (13) kde  $T$  je perioda, která je rovna převrácené hodnotě frekvence  $T = \frac{1}{f} [s]$ .

$$D = \frac{t_{on}}{T} \cdot 100 [\%] \quad (14)$$

PWM modulaci zobrazuje Obrázek 14: Pulsně šířková modulace [12].

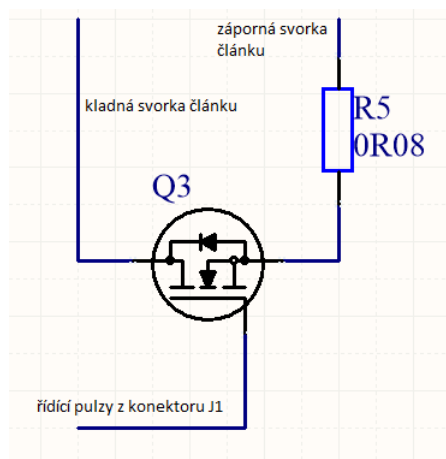


Obrázek 14: Pulsně šířková modulace [12]

Při zvětšování střidy PWM signálu dochází k prodloužení doby sepnutí tranzistorů což má za následek, že procházející proud bude větší.

Pomocí softwaru v mikroprocesoru lze tak měnit střidu PWM signálu a měnit tím i nabíjecí proud článku. Výše zmíněný systém spínání polo-můstku je v tomto zařízení využit pouze pro nabíjení článku. Polo-můstek lze teoreticky použít i pro vybíjení článku ale k tomu by musel být přizpůsoben napájecí zdroj celého systému. Jedním z možných řešení je vytvořit další měnič, který by na vstupu byl schopen rozhodovat zda má být systém napájen a nabíjet článek nebo odpojit napájení připojit zátěž a článek začít vybíjet. Dalším řešením je použít na vstup napájecí zdroj, který umí pracovat ve více kvadrantech. Takový zdroj, který pracuje stále na stejném napětí ale dochází ke změně směru proudu.

Z hlediska jednoduchosti je pro vybíjení článku polo-můstek odpojen vypnutím PWM signálu do gate-driveru U2 a je vybíjen pomocí třetího tranzistoru Q3. Zapojení pro vybíjení článku je na obrázku 15: Vybíjení článku.



Obrázek 15: Vybíjení článku

Tranzistor je připojen k článku přes výkonový odpor  $R_5$ . Přivedením napětí na elektrodu gate tranzistoru  $Q_3$  dojde k sepnutí a obvodem začne procházet proud. Proud způsobí úbytek napětí na odporu  $R_5$  a tím se začne článek vybíjet. Celou zátěž v tomto případě tvoří tranzistor  $Q_3$  v sérii s odporem  $R_5$ . Úbytek napětí na odporu  $R_5$  je dán podle Ohmova zákona, vztah (13).

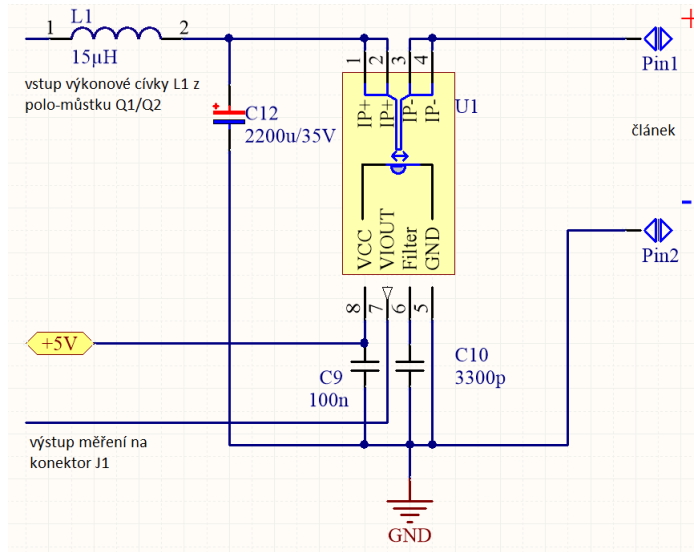
$$U = IR [V] \quad (15)$$

K úbytku podle (13) je zapotřebí připočítat ještě úbytek napětí na tranzistoru  $Q_3$ , který bude vypadat obdobně jako ve vztahu (13) ale za  $R$  je dosazen vnitřní odpor polovodičového přechodu tranzistoru v sepnutém stavu. Součet obou úbytků napětí je úbytek napětí na celé zátěži. Protože je vybíjecí proud článku většinou větší než proud, kterým článek nabíjíme je i při vybíjení nutné dimenzovat vybíjecí obvod. Výkon, který rezistor a tranzistor proměnní pouze v teplo, a je tedy nutné ho ze součástek odvést, zjistíme podle vztahu (11). V případě výkonu na odporu  $R_5$  je za odpor dosazena jeho hodnota.

Protože teplo, které je potřeba odvést ze součástek není zanedbatelné musíme na vybíjecí obvod navrhnout systém chlazení. Tranzistor  $Q_3$  je stejný jako tranzistory  $Q_1$  a  $Q_2$ , také v pouzdře TO-220. Způsob chlazení rezistoru  $R_5$  je osazením součástky mimo desku plošného spoje. Na desce jsou vytvořeny pouze dostatečně velké prokovené otvory kam jsou přiletovány vodiče na jejichž koncích je připojen rezistor  $R_5$ . Rezistor tak nezahřívá cesty v desce a lze ho upevnit na větší chladič, který umožní efektivní odvod vzniklého tepla. Na tranzistor  $Q_3$  je připojen chladič, který používá aktivní systém chlazení. Chladič na tranzistoru  $Q_3$  odvádí teplo ze svého žebrování pomocí ventilátoru, který je napájen ze vstupu  $+24V$ .

Nabíjení článku spočívá ve vytvoření indukovaného napětí v cívce  $L_1$  pomocí spínání polo-  
můstku složeného z tranzistorů  $Q_1$  a  $Q_2$  a následného nabití elektrolytického kondenzátoru

C12. Energie akumulovaná v cívce napájí elektrolytický kondenzátor a zároveň generuje proud do článku. Napětí na kondenzátoru C12 způsobuje zvýšení napětí na připojeném článku. Celý princip je názorně zobrazen na Obrázku 16: Připojení článku.

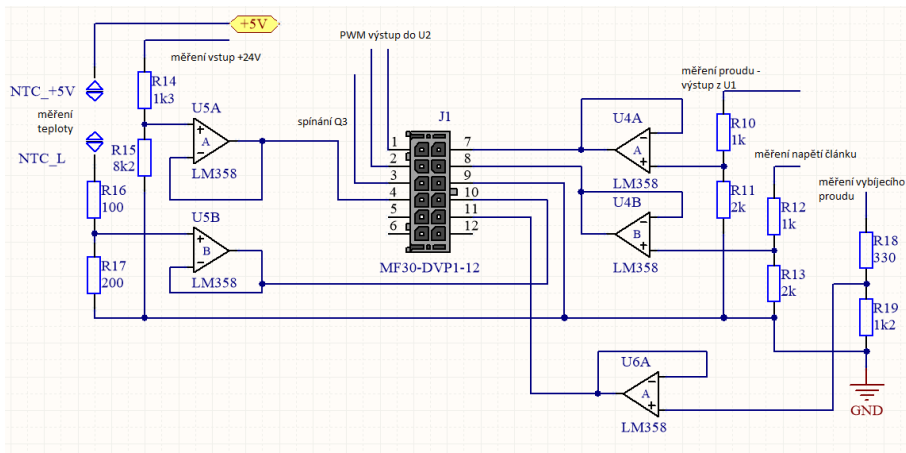


Obrázek 16: Připojení článku

Ze schématu je vidět zapojení výkonové cívky L1, která vytváří nabíjecí proud pro článek, elektrolytického kondenzátoru, který zásobuje článek napětím. V zapojení je připojen senzor proudu označený jako U1. Senzor je napájen +5V a na vstup má připojen blokovací kondenzátor C9. Senzor měří procházející proud na principu Hallova jevu. Halův jev je princip založený na vodiči nebo polovodiči vloženým do magnetického pole tak aby vektor magnetické indukce  $\vec{B}$  byl na vodič nebo polovodič kolmý. Průchodem elektrického proudu vodičem působí na volné nosiče náboje elektromagnetická síla  $\vec{F}_m$ , která je vychyluje a na vodiči pak nejsou volné nosiče náboje rozloženy konstantně což vyvolá rozdíl potenciálů na obou koncích vodiče. Výsledný rozdíl potenciálů je Hallovo napětí  $U_H$ . Pomocí Hallova jevu můžeme jednoduše změřit procházející proud vodičem. Výstupem ze senzoru je tedy napětí, která je přivedeno na vstup MCU přes konektor J1.

Poslední částí obvodu je realizace rozhraní pro komunikaci s mikroprocesorem, který není součástí PCB ale je připojen z vývojového kitu. Důvodem absence zapojení mikroprocesoru ve schématu je možnost připojení jiného mikroprocesoru čímž vzniká možnost volby. Možnost volby mikroprocesoru je hlavně z důvodu, že zařízení je možné řídit mikroprocesorem pracujícím s 8-bitovými registry a celkově jednodušší strukturou nebo mikroprocesorem pracujícím na jádru ARM (z angl. Advanced RISC Machine), které je v dnešní době velmi používané zejména v oblasti trakčních systémů. Samotné rozhraní mezi deskou a vývojovým kitem je ře-

šeno pomocí 12-pinového konektoru typu MF-30 označeného jako J1. Zapojení je na Obrázku 17: Rozhraní s MCU.



Obrázek 17: Rozhraní s MCU

Je zvolen konektor s více piny než je zapotřebí, protože se počítá v dalších verzích s rozšíření měření dalších veličin a aktuálně je na konektor již vyhrazeno místo na desce plošného spoje. Co se týká zapojení konektoru tak piny 1 a 2 jsou generované PWM signály pro gate-driver U2, na pinu 3 je výstup třetího PWM signálu, který spíná tranzistor Q3 a umožňuje vybíjení. Ostatní piny konektoru slouží k měření. Měření je vždy realizováno pomocí operačního zesilovače, který je zapojen jako napěťový sledovač. Zapojený jako napěťový sledovač znamená, že jeho výstup je spojen se záporným vstupem. Operační zesilovač se snaží tak vytvořit na výstupu takové napětí aby vyrovnal napětí, které je přivedeno na jeho kladnou svorku. Použitý operační zesilovač je typu LM358, jedná se o jednoduchý operační zesilovač, který dokáže pracovat s hodnotami napětí s malou hysterezí. Na kladný vstup operačních zesilovačů je měřené napětí připojené vždy přes napěťový dělič, aby byl ošetřen měřící rozsah, který je schopen mikroprocesor rozlišit. Princip napěťového děliče spočívá v rozkladu úbytků napětí na jednotlivých rezistorech spojených v sérii. Výstupem je pak napětí, které je způsobené průchodem proudu jednoho z rezistorů. Obecně lze výstupní napětí spočítat podle vztahu (16).

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_2} [V] \quad (16)$$

Ze vztahu (16) vyplývá, že pokud platí  $R_1 = R_2$  výstupní napětí  $U_{out}$  je pak rovno polovině napětí na vstupu  $U_{in}$ . Například na pinu 4 je připojeno měření vstupního napětí +24V přes dělič složený ze dvou odporů o velikostech 8,2 kΩ a 1,3kΩ. Pokud bude přivedené napětí +24V na vstupu operačního zesilovače U5A bude napětí podle vztahu (16) rovno přibližně 3,3V. Napětí 3,3V odpovídá maximálnímu rozsahu měření vstupu mikroprocesoru. Výpočet ukazuje vztah (17).

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 24 \cdot \frac{1300}{1300 + 8200} \doteq 3,3 [V] \quad (17)$$

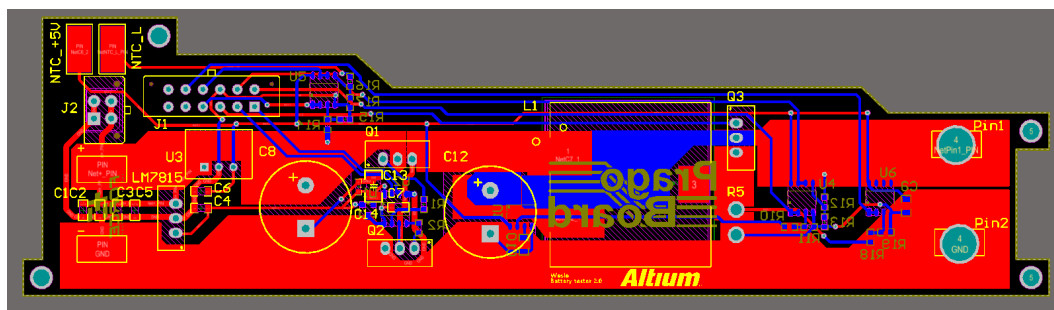
#### 4.1.2 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE

Při návrhu desky plošného spoje byl použit program Altium Designer. Nejdůležitější bylo uspořádání součástek, a rozdělení spojů, které jsou potřeba dimenzovat na větší proudy. Dalším úkolem bylo navrhnout desku plošných spojů tak, aby bylo možné ji umístit například do obalu nebo aby mohla zůstat stát na stole.

Nejdříve je nutné si uvědomit, že pro nabíjení a vybíjení článku jsou zapotřebí větší proudy (zpravidla až několika ampér) a proto je nutné dimenzovat desku plošných spojů. Dimenzování lze zabezpečit správnou šířkou vodivých cest a vhodným systémem chlazení, které bývá zpravidla pasivní. V první řadě je důležité rozdělit spoje na desce na silové a signálové. Při uspořádání součástek, které pracují zejména se signály a jejich odběr není nijak markantní, musíme brát navíc v úvahu o jaké signály se jedná. Existuje totiž řada komunikačních linek (napěťové, proudové, sériové nebo paralelní atd.), které mohou být ovlivněny elektromagnetickým polem, generovaným ze zdroje napájení. V tomto případě je nutné součástky a komunikační linky ukládat separovaně od silových cest a zdrojů na desce. Jedním z možných řešení je umístit napájecí cesty na dvě vrstvy (vrchní a spodní) a signály pak vést ve dvou vnitřních cestách. Tento způsob řešení umožní, že vytvořené pole průchodem elektrického proudu horní vrstvou, je vyrušeno polem vygenerovaným cestou ve spodní vrstvě. Signálové vrstvy nejsou pak téměř ničím rušeny nedochází ke zkreslení. V tomto případě ale PCB pak musí obsahovat 4 vrstvy a jeho výroba je tak nákladnější.

Zařízení bylo vyvíjeno včetně ohledů na funkčnost, mobilitu tak i jeho náklady na výrobu. Zařízení obsahuje vrchní vrstvu, která vede veškerý proud a napájení celé desky. Vrchní vrstva je zpravidla tvořena silovým signálem ze svorky „+“ a ze svorky „GND“. Mezi těmito body je připojeno napájecí napětí +24V a proud dosahující až několika jednotek ampér. Spodní vrstva obsahuje součástky, které zajišťují měření a převod napěťových signálů pro mikroprocesor. Jedním z výhod uspořádání v tomto zařízení je, že napájecí cesty nemusí být propojeny skrz tzv. „prokovy“, které způsobují na vodivé cestě větší indukčnost. Pokud indukčností prochází proud, indukuje se napětí a to způsobuje nepříznivé vlivy na stabilitu napájení. Další výhodou tohoto řešení je použití pouze dvou vrstev a tím snížení nákladů na výrobu nebo jednoduchost návrhu. Způsob rozmístění součástek a propojení součástek ve dvou vrstvách ukazuje Obrázek 18: Deska plošných spojů.





Obrázek 18: Deska plošných spojů

Z Obrázku 18 si můžeme všimnout rozlišení horní vrstvy „Top Layer“ a spodní vrstvy „Bottom Layer“. Horní vrstva je vyznačena červenou barvou. Spodní svorka „-“, nebo také nazvaná „PIN GND“ je spojena po celé délce desky co nejvíce do široka. Přes tuto cestu se uzavírá všechny proud obvody. Po celé délce desky je z důvodu, že celé zařízení pracuje pouze s jedním opačným potenciálem tzv. „země“. Spodní vrstva je vyznačena modrou barvou. Modré spoje jsou mezi konektorem a operačními zesilovači. V některých případech je spodní vrstva využita jako propoj horní vrstvy, pomocí již zmíněných „prokovů“. Jedinou výjimkou je zde využití spodní vrstvy pro měření nabíjecího proudu. Všimneme si otvorů téměř v rozích desky plošného spoje. Slouží pro přidělaní distančních sloupků, které umožňují použití právě spodní vrstvy a zároveň umožňují cirkulaci vzduchu kolem celé desky a cesty jsou pak lépe chlazené.

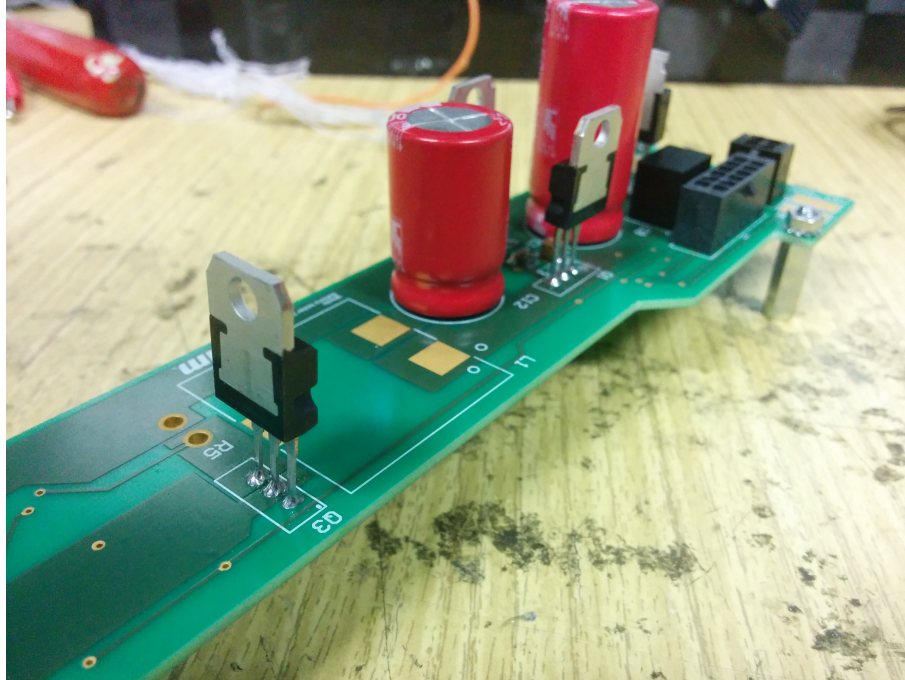
Důležitým krokem po vytvoření návrhu a zadáním výroby firmě, která disponuje potřebnou technologií pro výrobu desek plošných spojů, je vybrané součástky osadit. Součástky se osazují buď ručně, jako je to v případě vývojových desek, prototypů nebo zařízení, které nebudou vyráběny ve větších sériích, nebo pomocí osazovacího CNC stroje. Stroj obsahuje program, podle kterého nejdříve nanese pastu, která obsahuje kuličky cínu, následně na místa označená programem osadí různé součástky podle zadání a následně je deska vystavena vysoké teplotě, kde dojde k roztavení pasty a zapájení součástek. V případě vývoje testeru baterií se jedná zatím o vývojový prototyp, proto nebyla technologie strojního osazování použita.

Nejdříve byli osazeny součástky SMD. Konkrétně keramické kondenzátory, rezistory a následně operační zesilovače, senzor proudu nebo řadič pro spínání gate tranzistorů Q1 a Q2. Po osazení SMD součástek a dokončení osazení spodní vrstvy byla osazena horní vrstva. Nejdříve zdroje napájení LM7815 a U3 a následně tranzistory Q1, Q2 a Q3. nakonec byli osazeny elektrolitické kondenzátory, výkonová cívka L1, konektory a připojeny vodiče s napájením a výstupem na článek.

Vodič pro napájení desky je dimenzován na průřez  $2,5\text{mm}^2$ , protože není počítáno s více než 16A. Vodič pro nabíjení článku je také dimenzován na  $2,5\text{mm}^2$ . Napájecí vodiče jsou k desce přiletovány, aby se tak stali součástí zařízení a vodiče pro nabíjení článku jdou k desce připojeny přes krimpovací oka a přišroubovány šroubem. Šroub představuje spoje mezi

článkem a výstupem ze zařízení.

Ukázku částečně osazené desky zobrazuje Obrázek 19: Osazování DPS.



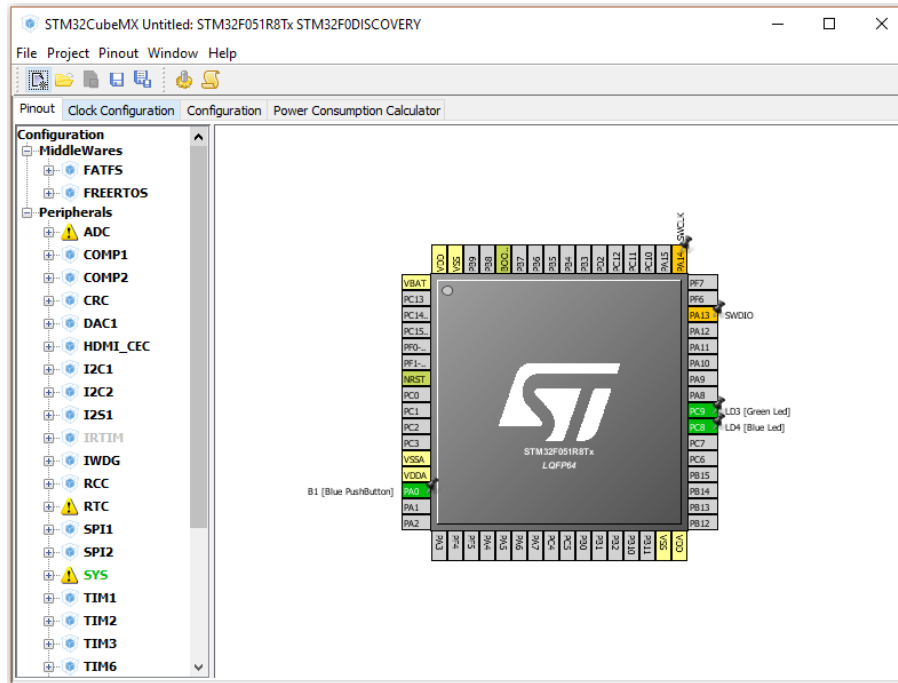
Obrázek 19: Osazování DPS

## 4.2 SOFTWARE [16][15][13]

Jako řídicí část celého zařízení byl zvolen vývojový kit Discovery s procesorem STM32F051R8 od firmy STMicroelectronics. Zvolením vývojového kitu zařízení dostává možnost využít i jiný způsob řízení nebo změnu mikroprocesoru. Důležitým faktorem pro rozhodnutí využít vývojový kit je skutečnost, že zmíněný procesor pracuje na jádru ARM, což je dnes velmi používaná architektura zejména v oblasti automotive. Vývojový kit umožňuje seznámení se s moderní architekturou ARM a umožňuje výměnu řídicí části zařízení odpojením konektoru. K programování mikroprocesoru je na vývojovém kitu připraven FTDI chip, který zajišťuje převod z připojeného USB z PC na výstup pro programování mikroprocesoru přes SPI protokol.

Software byl vyvíjen pomocí programů Keil uVision MD5, STCUBEMX, Source Insight a všechny kódy byly napsané v jazyce C. Bylo využito možnosti použití tzv. „HAL knihoven“. HAL (z angl. Hardware Abstraction Layer) knihovny jsou připravené knihovny vyvinuté komunitou kolem STM procesorů, které obsahují API (z angl. Application Programming Interface) pro jednodušší používání periférií procesoru. Společnost STMicroelectronics vyvinula

program STCUBEMX, který slouží pro zjednodušení rutinní práci programátorů. Pomocí software STCUBEMX lze jednoduše připravit konfigurační soubory pro používaný mikroprocesor pomocí zjednodušené vizualizace v programu. Ukázka je na Obrázku 20: STM32CubeMX.



Obrázek 20: STM32CubeMX

Dalším programem pro vývoj software je Keil uVision MD5. Program je mezi vývojáři vestavěných systémů (angl. embedded systems) velmi rozšířený. Program slouží pro kompilaci napsaného software pomocí jeho vlastních kompilátorů a následné nahrávání vytvořeného .hex souboru do mikroprocesoru. Posledním zmíněným programem používaný pro vývoj je program Source Insight. Jedná se o freeware, který umožňuje jednodušší vývoj. Při vytvoření projektu v programu Source Insight lze tzv. spojit jednotlivé hlavičkové a zdrojové soubory mezi sebou a program umožňuje pak náhled do definic používaných funkcí při programování a bez přepínání oken nebo záložek. Další výhodou je propojení s programem Keil uVision. Propojení je výhodné z důvodu, že při změně kódu v programu Source Insight jednoduše Keil nabídne detekovanou změnu i u sebe a to i pro případ změny pro více souborů. Reakce na změny v kódu fungují i zpětně z programu Keil uVision do programu Source Insight.

Při vývoji software bylo nutné stanovit požadavky. Hlavními požadavky bylo zprovoznit řízení řadiče pro polomůstek Q1 a Q2 pomocí periferie PWM (z angl. Pulse Width Modulation; česky Pulsně šířková modulace), čtení analogových hodnot pomocí periferie ADC (z angl. Analog to Digital Converter; česky Analogově digitální převodník) a odesílání přečtených hodnot

pomocí periferie USART (z angl. Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter; česky Synchronní/Asynchronní sériové rozhraní).

Protože mikroprocesor je zařízení, které umí vykonávat pouze jednu jedinou instrukci v daný moment, je nutné zajistit časování, o které se umí starat periferie TIMER (česky Časovač). Mikroprocesor STM32F0 disponuje 16-ti bitovým časovačem, který je využit. Mikroprocesor obsahuje vnitřní časování, jeho vlastní krystal, který zaručuje, že mikroprocesor pracuje na frekvenci  $48MHz$ . Pro zajištění správného časování a určování priorit mikroprocesoru budeme využívat systém přerušení (angl. Interrupt Service Routine - ISR).

Mikroprocesor obsahuje tabulku vektorů přerušení, která obsahuje adresy v paměti, kam systém přerušení odkáže PC (angl. Program Counter; česky čítač instrukcí) aby vykonával další instrukce od dané adresy. Stane se tak při dokončení určité akce, kterou daná periferie vykonává. Například čítač bud neustále přičítat hodnotu „+1“ a zvyšovat hodnotu svých registrů do doby, než dosáhne svého maxima, které má v našem případě velikost  $2^{16} = 65536$ . Časovač bude přičítat „+1“ úměrně frekvenci, na které pracuje mikroprocesor. Doba a rychlost lze upravit za použití tzv. „předděličky“, kterou lze nastavit v konfiguračních souborech. Bez použití „předděličky“ procesor pracuje na frekvenci  $48MHz$ , což odpovídá periodě podle vztahu 18. Přibližně bude časovač zvyšovat svou hodnotu o jedna každých 20ns.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{48 \cdot 10^6} \doteq 2 \cdot 10^{-8} [s] \quad (18)$$

Řídit periferie mikroprocesoru pomocí časovače lze jednoduše dvěma způsoby. Prvním z nich, je číst hodnotu registru časovače a na základě hodnoty volat systém přerušení, což je velmi neefektivní způsob. Druhým, lepším způsobem řízení přerušení, je využít přerušení přímo od časovače. Na začátku inicializujeme hodnotu v časovači číslem, od kterého když čítač začne přičítat každých 20ns o jedna, tak aby při dočítání do jeho maximální hodnoty 65536 uběhla námi zvolená doba - například 1s. Čítač po dočítání nastaví jeden ze svých bitů do logické jedna a naznačí tím mikroprocesoru, že má hotovo a žádá o přerušení. Mikroprocesor dokončí poslední prováděnou instrukci a ISR nastaví do PC adresu, na které pokračuje mikroprocesor v práci. Na adrese začíná program, který se stará o čtení hodnoty z ADC převodníku nebo například generuje PWM signál pro řízení řadiče polo-můstku Q1 a Q2.

Pro efektivní řízení lze přerušení od každé periferie rozlišit pomocí nastavením priorit. Pokud tedy potřebujeme, aby byla generace PWM signálů stoprocentní a byla schopna přerušit i čtení hodnot nastavíme ji vyšší hodnotu. Neznamená to, že bychom o data z periferie ADC měli přijít, ale že preferujeme řízení samotného nabíjení. Zařízení tedy obsahuje prioritu v generování PWM signálu oproti čtením samotných hodnot nebo odesíláním jich do počítače pomocí periferie USART.

Software v mikroprocesoru tedy obsahuje systém přerušení, který je řízen pomocí periferie časovače a rozlišujeme dvě úrovně priorit přerušení, kde na nejvyšší hladině je program, který generuje PWM signály pro řízení řadiče polo-můstku Q1 a Q2 a na nižší hladině je čtení hodnot

z ADC převodníku, odesílání dat pomocí USART a výstup pro spínání tranzistoru Q3, který je spínán pouze jednoduchým digitálním výstupem mikroprocesoru, na základě nepřímého měření proudu. Celý systém obsahuje podmínky, které se kontrolují při každé smyčce, kterou mikroprocesor vykonává a kontrolují se zde hodnoty vstupní napětí, napětí na článku, jeho teplota nebo nabíjecí a vybíjecí proud. Na základě těchto podmínek, je program schopen vypnout celý systém. Bohužel nedojde k vypnutí přísunu napětí, protože napájení systému není řešené pomocí softwarově řízeného spínače.

## 5 ZÁVĚR

Při ožívování zařízení se ukázalo několik chyb, které bylo nutné odstranit. Při uvádění zařízení do provozu je důležité dodržet několik kroků. Prvním krokem by měla být kontrola desky plošného spoje, protože už při výrobě se může stát, že se některé cesty správně nespojí, nebo se naopak spojí cesty co spojené být nemají. Ve většině případů stačí proměřit alespoň napájecí cesty, tedy změřit, že nikde není zkrat mezi kladným potenciálem a potenciálem tzv. země.

Po výrobě PCB nebyla nalezena chyba v podobě zkratu na napájecích cestách proto bylo možné začít na desku osazovat elektronické a elektromechanické součástky. Pro osazování existuje několik metod, které jsou vždy prováděny buď ručně nebo pomocí CNC osazovacího stroje. Tester baterií byl osazován ručně, protože se jedná pouze o vývojový prototyp a hlavně se nejedná o sériovou výrobu.

- metoda postupného osazování - v praxi nepoužitelná metoda, ale způsob, kterým byl tester osazen
- metoda osazování podle osazovacího plánu - při plánování výroby je vytvořen osazovací plán, který značně ulehčuje a zrychluje práci osazování

Zařízení bylo osazováno postupně bez vytvoření osazovacího plánu. Nejdříve byli osazeny zdroje napětí, které mění vstupní napětí na nižší úroveň pro napájení ostatních systémů zařízení. Následně byli přiletovány vodiče pro vstupní napájení, které jsou dimenzované na  $2,5\text{mm}^2$ , což odpovídá maximálnímu proudu 16A. Zvolená hodnota je předdimenzována záměrně aby nedošlo k přetavení vstupních plošek na PCB. Zařízení bylo připojeno ke stejnosměrnému napájení +24V a pomocí multimetru změřeny hodnoty na výstupu z měničů pro +5V a +15V. Měření napětí proběhlo bez problému. Následně byli osazeny zbylé součástky. Nejdříve součástky SMD, protože zabírají nejméně místa a nemohou tak překážet jako například vysoké THT elektrolytické kondenzátory.

Při prvním spuštění bylo důležité, otestovat nejdříve zapojení naprázdno. Bohužel jsem nedodržel tuto podmínku a zapojil jsem zařízení přímo k baterii. Následně byl vytvořen program, který měl řídit spínání polo-můstku Q1 a Q2. Jak bylo již uvedeno v ELEKTRICKÉ SCHÉMA bylo nutné dodržet správnou periodicitu spínání jednotlivých tranzistorů. První program bohužel otevřel oba N-MOS tranzistory a polo-můstek Q1 a Q2 se dostal do zkratu čímž došlo ihned k destrukci obou dvou tranzistorů.

Dalším krokem byla změna generovaných PWM signálů. Původně byl navržen systém, který využíval jednoho časovače pro generování PWM signálů na dvou nezávislých kanálech. Původní řešení ale způsobovalo špatné časování obou výstupních signálů. Špatné časování vznikalo na základě volání funkcí pro generování přerušení a způsobovalo chybné spínání polo-můstku a vznikalo tak velké zvlnění proudu, které ohřívalo součástky. Řešením bylo, že bez připojené zátěže byl přes konektor připojený vývojový kit s mikroprocesorem naprogramován aby na jeho výstupních pinech generoval komplementární PWM signály pro řadič polo můstku Q1 a Q2. Nastavená střída komplementárních PWM signálů byla nastavena na 50% a výstup zařízení naprázdno byl 12V stejnosměrného napětí.

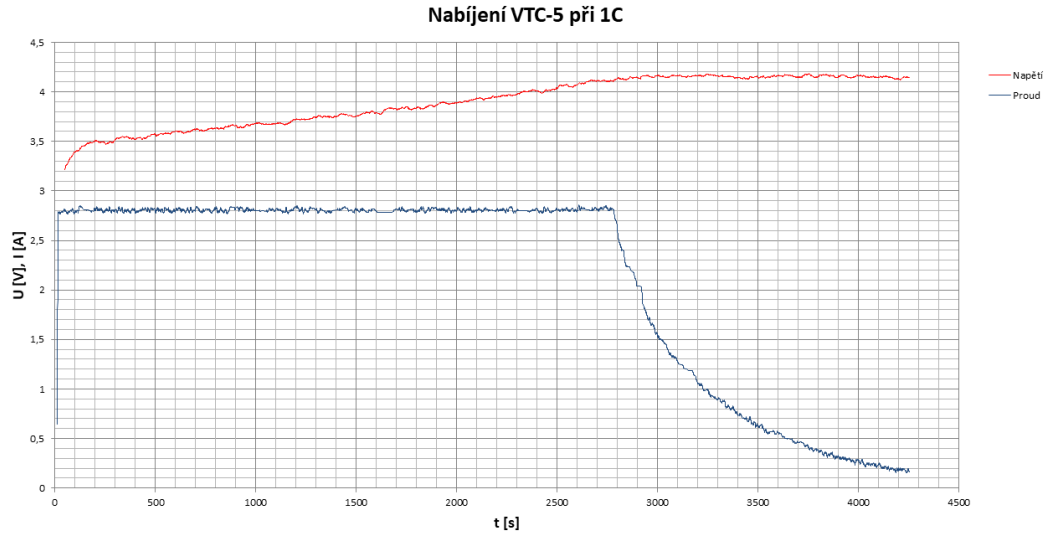
Po ověření výstupního napětí naprázdno byla připojena proměnná zátěž reprezentována proměnným rezistorem s parametry  $6,7\Omega/10A$  přes ampérmetr pro ověření výstupního proudu. Regulací rezistoru byl ověřen výstupní proud a funkčnost zařízení generovat stabilně 10A na svém výstupu, bez použití aktivního chlazení. Polo můstek Q1 a Q2 je chlazen pouze dvojicí menších chladičů, které jsou připojeny k jejich Source elektrodě přes tepelně vodivou pastu, která zvyšuje účinnost chlazení.

Pomocí SW a použití periférií ADC pro převod analogových napětí, měřených v obvodu, bylo nutné vytvořit regulační smyčku pro stabilizaci výstupního proudu. Bohužel při návrhu PCB nebyla dodržena pravidla pro rozmístění součástek do dvou vrstev a plošky pro osazení čipu operačních zesilovačů byli obráceny zrcadlově. Bohužel tak došlo k destrukci již připojených operačních zesilovačů a byla nutná jejich výměna včetně ohybu vývodů. Po správném zaletování čipů bylo nutné ověřit rozsah výstupního napětí pro měření regulační smyčky. Následně došlo k zjištění, že spojením záporného potenciálu obvodu, tedy tzv. země, která je schématicky společná pro výkonovou i řídicí část, docházelo ke značnému zkreslení měření. Při zvyšování proudu, vznikal velký úbytek napětí na společné GND svorce a měřené napětí naopak klesalo i přes zvyšující se proud. Díky přerušení spojení s výkonovou zemí a připojení měřících obvodů do jiného bodu země desky plošných spojů byl problém odstraněn.

Následně byli překonfigurovány periferie procesoru TIMER a ADC aby při generování pulzu v čase  $t_{on}$  byli odečteny hodnoty z měření. Při frekvenci  $100kHz$  stačí odečítat hodnotu s frekvencí  $10kHz$  abychom nepřehltli procesor zbytečným výpočetním výkonem, který by byl pro výpočet a regulaci zbytečný. Pro vypočtení správné hodnoty je nejdříve nutné změřit hodnotu, která odpovídá nulovému proudu, tzv. offset hodnota. Dále je offset odečten od reálně změřené hodnoty proudu. Výsledek je dělen maximálním rozsahem 12-bitového AD převodníku. Vynásobením referencí procesoru, což v případě STM32F0 jsou 3,3V dostaneme odpovídající hodnotu napětí. Pro skutečnou hodnotu proudu musíme výsledek vydělit citlivostí senzoru ACS712, která je 66mV/1A. Výsledný vztah pro výpočet je rovnice (19).

$$I = \frac{3300 \cdot \frac{ADC - offset}{4096}}{66} [A]$$

Ze změřené hodnoty proudu lze upravovat hodnotu komparačního registru TIMERU a vytvořit tím regulační smyčku, která bude schopna udržet stabilní výstupní proud pro nabíjení



Obrázek 21: Ukázka měření Li-Ion článku VTC-5 při 1C

článku. Pro ostatní měření hodnot bylo překonfigurována periferie ADC pro více kanálů a v přerušení přepočítávané hodnoty do globálních proměnných.

Hodnoty byli odeslány po sériové komunikaci UART do počítače, kde převod mezi linkou UART a USB zajišťuje jednoduchý převodník. Čtení dat z USB je řešeno pomocí programu BRAYTerminal, který umí přečtené data ukládat do souboru. Změřené data jsem následně převedl do programu MS Excell a vytvořil jednoduchý graf pro nabíjení jednoho článku VTC-5. Průběh nabíjení článku při hodnotě proudu 1C, což odpovídá zhruba něco kolem 2,5A zobrazuje Obrázek 21: Ukázka měření Li-Ion článku VTC-5 při 1C.

Naměřené hodnoty značně kolísají a vznikají chyby, protože jejich měření není úplně přesné. Chyby jsou způsobené použitým procesorem, který nemá dostatečně rychlé AD převodníky, operačními zesilovači, které mají určitou chybu měření a zejména pak připojeným vývojovým kitem, který byl připojen přes vodiče delší než 20cm.

## Seznam obrázků

1	Voltův článek [2]	2
2	Zatěžovací charakteristika skutečného zdroje [3]	4
3	Náhradní schéma napěťového zdroje	5
4	Náhradní schéma pro proudový zdroj	5
5	DoD - Hloubka vybíjení [5]	7
6	Vnitřní odpor v závislosti na stáří a teplotě [6]	8
7	Závislost počtu cyklů na kapacitě a teplotě [7]	9
8	Nabíjení článku [8]	10
9	BMS - Řídící systém baterií [9]	11
10	Blokové schéma měřicího zařízení pro cyklování článků	16
11	Napájecí část měřicího zařízení	18
12	Závislost kapacity keramických kondenzátorů na napětí [11]	19
13	Řízení polo-můstku Q1 a Q2	22
14	Pulsně šířková modulace [12]	24
15	Vybíjení článku	25
16	Připojení článku	26
17	Rozhraní s MCU	27
18	Deska plošných spojů	29
19	Osazování DPS	30
20	STM32CubeMX	31
21	Ukázka měření Li-Ion článku VTC-5 při 1C	35

## Seznam tabulek

1	Parametry známých článků	3
2	Důležité standardy	12



## Reference

- [1] Voltův článek – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Volt%C5%AFv\\_%C4%8D1%C3%A1nek](https://cs.wikipedia.org/wiki/Volt%C5%AFv_%C4%8D1%C3%A1nek)
- [2] CHEMIE [online]. Dostupné z: <http://www.chemierol.wz.cz/voltuv%20clanek.jpg>
- [3] SPSMOH [online]. Dostupné z <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/obrazky/linzdrzch.gif>
- [4] Battery Testing, Test Methods and Procedures. Electropaedia, Energy Sources and Energy Storage, Battery and Energy Encyclopaedia and History of Technology [online]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/testing.htm>
- [5] Battery Testing, Test Methods and Procedures. Electropaedia, Energy Sources and Energy Storage, Battery and Energy Encyclopaedia and History of Technology [online]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/images/dod.gif>
- [6] Electropaedia, Energy Sources and Energy Storage, Battery and Energy Encyclopaedia and History of Technology [online]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/images/calendar%20life.gif>
- [7] Electropaedia, Energy Sources and Energy Storage, Battery and Energy Encyclopaedia and History of Technology [online]. Dostupné z: [http://www.mpoweruk.com/images/test\\_conditions.gif](http://www.mpoweruk.com/images/test_conditions.gif)
- [8] Elektronika Jaroslav Belza [online]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/charge/liion1ch.gif>
- [9] Kola Author, kola GT, elektrokola Haibike, vozíky Croozer, Chariot a THULE [online]. Copyright © [cit. 22.05.2017]. Dostupné z: <https://www.velofiala.cz/resize/af/655/460/files/elektrokola/mix/bms.jpg>
- [10] International Battery Standards. Electropaedia, Energy Sources and Energy Storage, Battery and Energy Encyclopaedia and History of Technology [online]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/standards.htm>
- [11] MaximIntegrated [online]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/images/appnotes/5527/5527Fig01.gif>
- [12] Savage///Circuits – A project website devoted to electronics & microcontrollers and the things we create. [online]. Dostupné z: [http://www.savagecircuits.com/images/projects/multicontroller\\_p2/part4\\_figure1\\_hi.png](http://www.savagecircuits.com/images/projects/multicontroller_p2/part4_figure1_hi.png)

- [13] ST Liberty Software License Agreement V2.: 301 Moved Permanently [online]. Copyright © 2017 STMicroelectronics. Dostupné z: [http://www.st.com/content/st\\_com/en/products/embedded-software/mcus-embedded-software/stm32-embedded-software/stm32cube-embedded-software/stm32cubef0.html](http://www.st.com/content/st_com/en/products/embedded-software/mcus-embedded-software/stm32-embedded-software/stm32cube-embedded-software/stm32cubef0.html)
- [14] [online]. Copyright © 2017 STMicroelectronics. Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data\\_brief/e2/98/be/f9/3c/6a/4e/91/DM00050631.pdf/files/DM00050631.pdf/jcr:content/translations/en.DM00050631.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/e2/98/be/f9/3c/6a/4e/91/DM00050631.pdf/files/DM00050631.pdf/jcr:content/translations/en.DM00050631.pdf)
- [15] [online]. Copyright © 2017 STMicroelectronics. Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/programming\\_manual/fc/90/c7/17/a1/44/43/89/DM00051352.pdf/files/DM00051352.pdf/jcr:content/translations/en.DM00051352.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/programming_manual/fc/90/c7/17/a1/44/43/89/DM00051352.pdf/files/DM00051352.pdf/jcr:content/translations/en.DM00051352.pdf)
- [16] [online]. Copyright © 2017 STMicroelectronics. Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/c2/f8/8a/f2/18/e6/43/96/DM00031936.pdf/files/DM00031936.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031936.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/c2/f8/8a/f2/18/e6/43/96/DM00031936.pdf/files/DM00031936.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031936.pdf)

## SEZNAM PŘÍLOH

[I] Schéma napájecí části

[II] Schéma řídicí části

[III] Deska plošných spojů

[IV] Zdrojový kód „main.c“ a systém přerušení „stm32f0xx\_it.c“

[V] Technické listy použitých elektronických součástek

## Obsah příloženého CD

- Projektový dokument pro Altium - „Logical.PrjPCB“
- Schéma napájecí části - „Power management.SchDoc“
- Schéma řídicí části - „Logical switching in\_out.SchDoc“
- Deska plošných spojů - „Main scheme.PcbDoc“
- Zdrojový kód - „main.c“
- Zdrojový kód systému přerušení - „stm32f0xx\_it.c“
- Datasheet MCU STM32F051R8 - „datasheet\_stm32f0\_mcu.pdf“
- Datasheet OZ LM358 - „datasheet\_LM358.pdf“
- Datasheet MOSFet STP55 - „datasheet\_MOSFet\_STP55.pdf“
- Datasheet Proudové čidlo ACS712 - „datasheet\_ACS712.pdf“
- Datasheet Budič MOSFetů IRS2001 - „datasheet\_IRS2001.pdf“
- Datasheet Napěťový regulátor LM7815 - „datasheet\_LM7815.pdf“
- Datasheet Napěťový regulátor FDSM Magic - „datasheet\_FDSM.pdf“