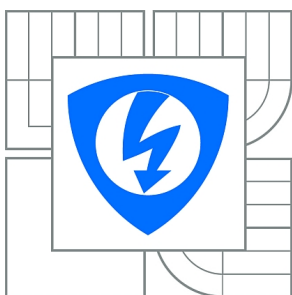




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## USB TESTER AKUMULÁTORŮ

USB BATTERY TESTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

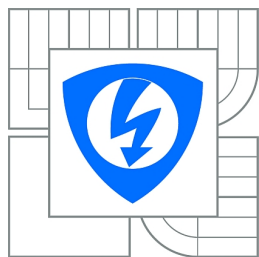
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LUKÁŠ ANDRYSÍK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. IVO LATTENBERG, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Lukáš Andrysík

**ID:** 145963

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

## USB tester akumulátorů

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte elektronický USB tester, který bude měřit kapacitu akumulátorů a baterií. U baterií to bude za cenu úplného vybití vzorku. Přístroj bude dále umožňovat měření vnitřního odporu. Vytvořte ovládací program pro PC, kde bude možno konfigurovat profil (akumulátory/baterie). U každého profilu se budou nastavovat parametry vybíjení, potřebné pro měření kapacity. Měření pak bude prováděno autonomně (i při vypnutém PC za předpokladu trvalého napájení USB portu). Program bude zobrazovat graficky informace o průběhu vybíjení článku zaznamenané testerem během vybíjení.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ARENDÁŠ, M., RUČKA, M. Nabíječky a nabíjení. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2002, 112 stran, ISBN 80-86056-61-9.
- [2] BRTNÍK, B., MATOUŠEK, D. Mikroprocesorová technika BEN - technická literatura, Praha 2011, 152 stran, ISBN 978-80-7300-406-4.
- [3] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry Atmel AVR. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2006, 376 stran, ISBN 80-7300-209-4.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 4.6.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## Abstrakt

Tato práce se zabývá konstrukcí testeru akumulátorů a problematikou nejznámějších primárních a sekundárních elektrochemických článků. Je tvořena čtyřmi částmi – první se zabývá obecným popisem nejpoužívanějších elektrochemických článků v současnosti, jejich vlastnostmi, výhodami, nevýhodami a oblastí použití. Druhá se týká návrhu vlastního zařízení určeného k jejich testování, popisem jednotlivých bloků obvodu a výpočtem potřebných hodnot spolu s návrhem řídicího software. Třetí část se věnuje mechanické konstrukci a výrobě DPS. Poslední část je věnovaná srovnání vlastností několika typů článků z hlediska kapacity a jejich výkonu při rozdílných podmínkách.

## Klíčová slova

Akumulátory, Baterie, Mikrokontrolér, USB, Zdroj proudu, Sekundární článek, Primární článek, Elektrochemický článek, NiCd, NiMH, Li-ion

## Abstract

This bachelor's thesis contains construction of battery tester along with primary and secondary cells comparison. It consists of four parts – the first one focuses on general description of the most commonly used electrochemical cells, their characteristics, advantages and disadvantages. Second one relates to design a custom equipment for testing these cells including software, parts values calculations and common problems with the design. Third part is mainly about mechanical design and PCB manufacture. The last section is devoted to comparison of several models of cells in terms of capacity and performance under different conditions

## Keywords

Accumulator, Batteries, Microcontroller, USB, Current source, Secondary cell, Primary cell, Electrochemical cell, NiCd, NiMH, Li-ion

ANDRYSÍK, L. USB tester akumulátorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 57 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne 2. 6. 2014

.....  
Lukáš Andrysík

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivo Lattenbergovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této práce.

# OBSAH

|          |                                             |           |
|----------|---------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod do problematiky testeru</b>         | <b>8</b>  |
| <b>2</b> | <b>Elektrochemické články</b>               | <b>9</b>  |
| 2.1      | Historie . . . . .                          | 9         |
| 2.2      | Primární články . . . . .                   | 10        |
| 2.2.1    | Zinko-uhlíkové a zinko-chloridové . . . . . | 10        |
| 2.2.2    | Alkalické . . . . .                         | 11        |
| 2.2.3    | Stříbro-oxidové . . . . .                   | 11        |
| 2.2.4    | Lithiové . . . . .                          | 12        |
| 2.3      | Sekundární články . . . . .                 | 14        |
| 2.3.1    | Olověné . . . . .                           | 14        |
| 2.3.2    | NiMH . . . . .                              | 15        |
| 2.3.3    | Li-ion . . . . .                            | 16        |
| <b>3</b> | <b>Návrh zařízení</b>                       | <b>17</b> |
| 3.1      | Řady rezistorů . . . . .                    | 17        |
| 3.2      | Komunikace . . . . .                        | 17        |
| 3.2.1    | Převodníky USB - sériová linka . . . . .    | 18        |
| 3.3      | Indikace . . . . .                          | 20        |
| 3.4      | Napájení . . . . .                          | 20        |
| 3.4.1    | Nabíjení interního akumulátoru . . . . .    | 21        |
| 3.4.2    | Napájení obvodu . . . . .                   | 21        |
| 3.4.3    | Ochranný obvod akumulátoru . . . . .        | 22        |
| 3.5      | Mikrokontrolér . . . . .                    | 23        |
| 3.5.1    | Výběr paměti pro data . . . . .             | 23        |
| 3.5.2    | Životnost paměti . . . . .                  | 24        |
| 3.6      | Vstupní ochrana . . . . .                   | 24        |
| 3.7      | Zdroj proudu . . . . .                      | 25        |
| 3.7.1    | Zdroj nastavovacího napětí . . . . .        | 27        |
| 3.7.2    | Princip výběru proudu . . . . .             | 27        |
| 3.7.3    | Výpočet děliče . . . . .                    | 27        |
| 3.8      | Snímání napětí a proudu . . . . .           | 28        |
| 3.9      | Metodika měření . . . . .                   | 30        |
| 3.9.1    | Měření vnitřního odporu . . . . .           | 30        |
| 3.9.2    | Měření kapacity . . . . .                   | 30        |
| 3.10     | Návrh a implementace software . . . . .     | 31        |
| 3.10.1   | Princip měření . . . . .                    | 31        |

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| 3.11 Software na straně PC . . . . .                | 35        |
| <b>4 Konstrukce</b>                                 | <b>37</b> |
| 4.1 Výroba DPS . . . . .                            | 37        |
| 4.1.1 Návrh desky plošných spojů . . . . .          | 37        |
| 4.1.2 Vlastní výroba DPS . . . . .                  | 37        |
| 4.2 Mechanická konstrukce . . . . .                 | 39        |
| 4.2.1 Výběr krabičky . . . . .                      | 39        |
| 4.2.2 Odvod tepla . . . . .                         | 39        |
| 4.3 Ověření funkčnosti . . . . .                    | 40        |
| 4.3.1 Energetická náročnost . . . . .               | 40        |
| 4.3.2 Ověření proudové stability . . . . .          | 40        |
| <b>5 Měření</b>                                     | <b>41</b> |
| 5.1 Srovnání vnitřního odporu . . . . .             | 42        |
| 5.2 Měření kapacity při různých proudech . . . . .  | 43        |
| 5.3 Měření kapacity při různých teplotách . . . . . | 45        |
| 5.4 Závěry měření . . . . .                         | 46        |
| <b>6 Závěr</b>                                      | <b>47</b> |
| <b>Literatura</b>                                   | <b>48</b> |
| <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>             | <b>51</b> |
| <b>Seznam příloh</b>                                | <b>53</b> |
| <b>A Celkový vzhled zařízení</b>                    | <b>54</b> |
| <b>B Schéma zapojení</b>                            | <b>55</b> |
| <b>C Předloha pro výrobu DPS</b>                    | <b>56</b> |
| <b>D Osazovací plány</b>                            | <b>57</b> |
| D.1 Horní vrstva . . . . .                          | 57        |
| D.2 Spodní vrstva . . . . .                         | 57        |

# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY TESTERU

Zadáním této bakalářské práce bylo vytvořit tester primárních a sekundárních článků. Měřené veličiny budou jejich kapacita a vnitřní odpor, které budou měřeny mikrokontrolérem a zaznamenány do vnitřní paměti, ze které je bude možné načíst pomocí softwaru na PC. Software na PC bude také použit pro výběr vybíjecího profilu (proud, konečné napětí) a s naměřenými hodnotami bude provádět další operace, jako je zobrazení křivky napětí v čase, výpočet kapacity a podobně.

Práce se dělí na několik částí – v první jde o základní přehled nejvíce používaných primárních i sekundárních článků se zaměřením primárně na komerčně dostupné články pro použití koncovými spotřebiteli. Druhá část se věnuje návrhu měřiče a záležitostí s tím spojených, výpočty součástek, postupem a problémů při konstrukci finálního výrobku. Také je zde zmíněn návrh řídicího software. Třetí část je zaměřena hlavně na mechanickou konstrukci a výrobu DPS a také otestování základních funkcí přístroje. V poslední části jsem se zaměřil na srovnání několika typů běžně dostupných primárních i sekundárních článků velikosti AA („tužková baterie“). Jedná se o srovnání kapacity při různých vybíjecích podmínkách – ať už se jedná o změnu teploty či vybíjecího proudu.

Na začátku návrhu bylo nutné zvolit vhodný hardware, zvláště použitý mikrokontrolér. Svůj projekt jsem postavil na mikrokontroléru Atmel 328P-PU v pouzdře DIP z důvodu jednoduché případné výměny v prvotní fázi ožívování a programování. Jedná se o jednočipový osmibitový mikrokontrolér založený na architektuře RISC obsahující 32 kB paměti flash, ve které bude uložen hlavní řídicí program. Dále disponuje 1 kB paměti EEPROM pro uložení pracovních dat a také obsahuje 2 kB operační paměti SRAM. Mezi další důležité parametry patří desetibitový AD převodník, kterým budou v mém projektu odečítány hodnoty napětí a proudu při měření. Z hlediska rozhraní se jedná o 6 pinů připojených k AD převodníku a dále 11 univerzálních vstupně-výstupních digitálních pinů. Pro sériovou komunikaci jsou vyhrazeny dva digitální piny. Mikrokontrolér má zabudovaný interní oscilátor a prakticky může fungovat pouze po připojení externího napájení. Ovšem pro zpřesnění časování se doporučuje použít externí 16MHz krystal. [2]

## 2 ELEKTROCHEMICKÉ ČLÁNKY

### 2.1 Historie

Objev prvního galvanického článku sahá až do roku 1780, kdy Luigi Galvani objevil, že při současném dotyku žabího stehna nástroji z různých kovů dojde k jeho pohybu. Na základě těchto pozorování se Alessandro Volta rozhodl daný jev podrobněji prozkoumat a začal experimentovat s různými kombinacemi kovů a elektrolytů mezi nimi. V roce 1800 po sérii pokusů zjistil, že nejlepší kombinací je záporná zinková elektroda, kladná měděná elektroda a jako elektrolyt zředěná kyselina sírová. Jeho objev znamenal revoluci, jelikož se jednalo o první stabilní zdroj elektrické energie. Do té doby byla lidem známá pouze statická elektřina, jejíž využití bylo velmi omezené. Po tomto objevu následovala řada experimentátorů s různými konstrukcemi a variantami chemických článků. [3]

Ovšem až do roku 1859 se jednalo pouze o nenabíjecí, primární články. V tomto roce Gaston Planté objevil olověný akumulátor – první chemický článek, který bylo možné po vybití znovu nabít, což znamenalo další zásadní revoluci v tomto odvětví průmyslu. [21]

O několik desetiletí později, v roce 1899 švédský vědec jménem Waldemar Jungner vynalezl nikl-kadmiový akumulátor. Jednalo se o první sekundární článek s alkalickým elektrolytem. Jeho komerční výroba začala ve Švédsku roku 1910 a ve srovnání s doposud používaným olověným akumulátorem měl mnohem lepší energetickou hustotu. Byl bohužel ovšem také mnohem dražší. [28]

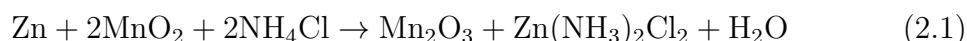
V současné době je na světě používána celá škála typů nabíjecích i nenabíjecích článků a jde jen těžko říct, který je lepší – každý typ má svá pro a proti a pro každý obor použití je vhodné zvážit vlastnosti nabízených typů a vybrat ten nejlepší.

## 2.2 Primární články

Primární články jsou zdroje elektrické energie přeměňující chemickou energii na energii elektrickou. Reakce probíhající v těchto člancích jsou nevratné, z čehož vyplývá, že články není možné po vybití znovu nabít (na rozdíl od sekundárních článků). Existuje mnoho chemických složení a velikostí primárních článků, které se od sebe odlišují dle zamýšleného použití. Níže bude uvedeno několik nejpoužívanějších typů.

### 2.2.1 Zinko-uhlíkové a zinko-chloridové

Zinko-uhlíkové články jsou nejobyčejnějším a nejlevnějším typem komerčně dostupných článků. Konstrukčně jsou složeny ze zinkového kalíšku, sloužícího zároveň jako záporná elektroda, dále uhlíkové tyčinky uprostřed ve funkci kladné elektrody a směsi oxidu manganičitého s uhlíkovým práškem nasáknutého elektrolytem – vodným roztokem chloridu amonného. V současných člancích elektrolyt tvoří směs chloridu amonného a zinečnatého. Zinko-uhlíkové články mají zásadní konstrukční nevýhodu – zinkový kalíšek tvořící stěny článku totiž neplní jen mechanickou funkci – slouží zároveň také jako záporná elektroda, která se v průběhu vybíjení rozpouští dle rovnice 2.1. Pokud tedy není vytvořen z dostatečně tlustého kovu, může dojít u vybitého článku k jejímu protržení a vytečení směsi elektrolytu mimo článek, čímž může dojít ke korozi a následnému poškození napájeného zařízení. Tento problém se vyskytoval hlavně dříve, kdy byly používány články s elektrolytem z čistého chloridu amonného, jelikož při vybíjení článku navíc také vznikala voda (viz rovnice 2.1). [14]



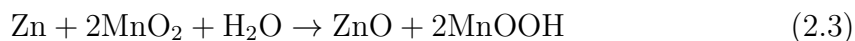
V současně vyráběných člancích je místo čistého chloridu amonného použita jeho směs s vysokým obsahem chloridu zinečnatého, při které je naopak voda spotřebovávána (viz rovnice 2.2). Tyto články jsou označovány jako zinko-chloridové, ačkoliv výrobci v praxi tyto oba typy vzájemně zaměňují a toto označení není všeobecně zažité. Jejich jmenovité napětí je 1,5 V.



Ačkoliv byl problém vytékání víceméně vyřešen, vzhledem ke špatným vlastnostem těchto článků se od jejich použití tak či tak postupně upouští – alkalické články mají výrazně lepší parametry. Ať už se jedná o kapacitu, nebo nižší samovybíjení a z toho vyplývající delší skladovatelnost. Také vnitřní odpor je nižší, což umožňuje jejich použití i ve výkonnější elektronice. [6]

### 2.2.2 Alkalické

Alkalické články jsou vylepšenou verzí článků zinko-uhlíkových. Jejich jméno dostaly z důvodu použití alkalického elektrolytu – hydroxidu draselného. Jejich jmenovité napětí je jako v případě zinko-uhlíkových 1,5 V. Hlavní částí článku je stále zinek, ačkoliv již ne v podobě kovového kalíšku. Je zde přítomen ve formě prášku tvořícího hlavní složku gelu obsahujícího hydroxid draselný a jiné pomocné látky, jejichž složení je závislé na konkrétním výrobcí. Dále je zde použita opět směs oxidu manganičitého a práškového uhlíku. Tyto dvě složky jsou od sebe odděleny separátorem ze syntetické tkaniny. Použití práškového zinku má za následek mnohem vyšší aktivní plochu zinkových částic a s tím související schopnost článku dodat vyšší proud. V alkalických článcích probíhá reakce mezi vodou, zinkem a oxidem manganičitým podle rovnice 2.3



Alkalické články jsou v současnosti nejspíše nejvíce rozšířeným typem primárních článků. Jejich hlavní použití je ve spotřební elektronice s nízkým až středním odběrem, kde mohou vydržet v provozu i několik let. Například dálková ovládání, hodiny, budíky a podobně. Ačkoliv mají nižší vnitřní odpor než zinko-uhlíkové, mají pořád vysoký vnitřní odpor pro použití v zařízeních s vysokým odběrem – zde by bylo ovšem i nepraktické provozovat tyto nenabíjecí články z ekonomického hlediska.[7]

### 2.2.3 Stříbro-oxidové

Stříbro-oxidové články mají vysokou kapacitu a životnost – až do objevení článků na bázi lithia měly nejvyšší známou energetickou hustotu. Konstrukčně jsou provedeny ze záporné elektrody opět ze zinku a kladné elektrody z oxidu stříbrného. Při vybíjení se zinek mění na oxid zinečnatý a oxid stříbrný na elementární stříbro. Reakce probíhá v elektrolytu hydroxidu draselného nebo sodného. Volba elektrolytu je závislá na účelu použití – články s hydroxidem sodným mají vyšší energetickou hustotu, verze s hydroxidem draselným má zase schopnost dodávat vyšší proudy.

V současné době se ve spotřební elektronice, hlavně z důvodu vyšší ceny ve srovnání s alkalickými a také faktem, že technologie alkalických článků dosáhla značného vylepšení, používají pouze v provedení malých knoflíkových článků do náramkových hodinek, kalkulaček apod. Ve velkém provedení byly tyto články použity při misích Apollo pro pohon lunárních roverů a jiných vojenských aplikacích (např. torpéda Mark 37). Oproti dříve uvedeným typům mají mírně vyšší jmenovité napětí - 1,55 V. [8][18]

### 2.2.4 Lithiové

Poslední hojně užívanou skupinou primárních článků jsou články lithiové. Na rozdíl od výše zmíněných jejich elektrolyt není založen na vodném roztoku, ale používá se soli lithia v různých organických rozpouštědlech. Mezi jejich hlavní výhody patří mnohem vyšší kapacita, nižší samovybíjení a u některých typů schopnost dodat velmi vysoké proudy. Určitá nevýhoda je vyšší cena způsobená náročností získávání kovového lithia a také je problematické hledisko bezpečnosti – lithium je alkalický kov, prudce reagující s vodou. Také používané elektrolyty jsou vysoce hořlavé, v některých případech i toxické. Existuje nepřehledné množství typů lišících se různým materiálem kladné elektrody a složením elektrolytu.

Záporná elektroda je vždy z kovového lithia, kladná je u nejčastěji používaných článků z **oxidu manganitého**, stejně jako v případě alkalických nebo zinko-uhlíkových článků. Příklad článků s touto elektrodou jsou mincové baterie řady „CR“ používané v dálkových ovladačích, základních deskách počítačů pro zálohu obvodu reálného času, případně v různých malých drobnostech typu svítilny, přívěšky na klíče. Jejich jmenovité napětí je 3 V a konstrukce je vidět na obrázku 2.4. Výhodou tohoto typu je relativně nízká cena, vysoká kapacita, vysoká proudová zatížitelnost a relativně bezpečný provoz. [5]



Obr. 2.4: Konstrukce článku CR2032

Dalším typem jsou články s kladnou elektrodou tvořenou kapalným chloridem thionylu. Můžeme se s nimi nejčastěji setkat v podobě záložních baterií v různých průmyslových zařízeních. Na rozdíl od typu s oxidem manganitým mají vyšší kapacitu a jmenovité napětí (3,6 V), mohou pracovat v širším spektru teplot (již od teplot hluboko pod bodem mrazu). Mezi nevýhody patří vyšší vnitřní odpor, což

je předurčuje pro použití s velmi nízkými proudy (zálohy pamětí, bezdrátové detektory apod.). Hlavní nevýhodou je obsah toxických látek, možnost výbuchu při nesprávném použití (zkrat, nabíjení) a dále také vysoká cena.

Poslední komerčně hojně používaný typ lithiových článků má kladnou elektrodu z **disulfidu železnatého**. Jejich jmenovité napětí je nižší než předchozích dvou – pouze 1,7 V, což z nich dělá dobrou přímou náhradu článků alkalických nebo zinko-uhlíkových. Ve srovnání s alkalickými články mají nižší vnitřní odpor, fungují i za nízkých teplot, mají vyšší kapacitu a menší samovybíjení. Také jejich napětí je téměř konstantní v průběhu vybíjení nízkým proudem a prudce poklesne až při úplném vybití článku – alkalické a zinko-uhlíkové články mají pokles napětí v zátěži téměř lineární. Tento pozvolný pokles může někdy vést k problémům u nesprávně navržených zařízení (například kontrast LCD displeje klesající s napětím, který nutí uživatele vyměnit článek za nový, ačkoliv v něm zbývá ještě např. 30 % energie). Na druhou stranu toto téměř konstantní napětí v zařízeních velmi ztěžuje detekci „vybité baterie“ s dostatečným předstihem. Z tohoto důvodu například nedoporučují výrobci bateriových kouřových hlásičů použití těchto článků. Jejich zásadním problémem je ale hlavně několikanásobně vyšší cena oproti ostatním typům.

[9]



Obr. 2.5: Lithiové články velikosti AA

## 2.3 Sekundární články

U sekundárních článků, nebo také akumulátorů, jsou chemické procesy vratné, tudíž vybitý článek lze nabitím obnovit do (téměř) původního stavu.

### 2.3.1 Olověné

Olověný akumulátor je nejstarším zástupcem sekundárních, nabíjecích článků. Roku 1859 jej objevil francouzský fyzik Gaston Planté. Ačkoliv má velmi nízkou energetickou hustotu, je i nyní stále velmi oblíbený v mnoha každodenních aplikacích. Mezi nejznámější oblast použití patří bezpochyby jeho provedení jako startovací baterie v automobilech. Další rozšířené použití je v záložních zdrojích napájení, ať již v malých UPS, ostrovních solárních systémech či celých akumulátorových např. pro telekomunikační systémy. Mezi jeho hlavní výhody patří nízká cena, dobře zvládnutá technologie výroby a schopnost dodat velmi vysoké proudy vzhledem ke kapacitě.

Obyčejný olověný akumulátor je tvořen dvěma deskami, mezi nimiž je zředěná kyselina sírová tvořící elektrolyt. Záporná deska je v nabitém stavu z čistého houbovitého olova (pro dosažení co nejvyšší aktivní plochy elektrod), kladná deska je tvořena oxidem olovičitým. Při vybíjení reagují obě tyto sloučeniny s elektrolytem a ve vybitém akumulátoru jsou obě elektrody tvořeny síranem olovnatým a elektrolytem je velmi zředěný roztok kyseliny sírové. Na tuto skutečnost je potřeba dávat pozor při používání těchto akumulátorů v prostředí pod bodem mrazu – zatímco elektrolyt plně nabitého akumulátoru zamrzne až při  $-60^{\circ}\text{C}$ , vybitého mrzne již při několika  $^{\circ}\text{C}$  pod nulou.

Postupem času bylo vytvořeno mnoho modifikací těchto akumulátorů. Moderní akumulátory nemívají elektrody z čistého olova, ale jejich vlastnosti byly vylepšeny přidáním legovacích látek – nejčastěji vápníku, cínu, antimonu a dalších. Pro různá použití byly také provedeny změny po konstrukční stránce.

Mezi nejznámější patří systém **AGM**. Chemicky jde o téměř totožný akumulátor, změna je hlavně mechanická – kapalný elektrolyt je nasáknut v netkané skelné textílii a článek je kromě bezpečnostního ventilu hermeticky uzavřen. To má za následek možnost provozovat baterii článků v libovolné poloze, čehož se využívá například v bateriích pro motocykly. AGM je podobné systému **GEL**, kde je elektrolyt v podobě tuhého gelu z velmi jemného oxidu křemičitého nasáknutého kyselinou sírovou. Tento článek lze také provozovat v jakékoliv poloze. Jmenovité napětí jednoho článku je 2,0 V [4]

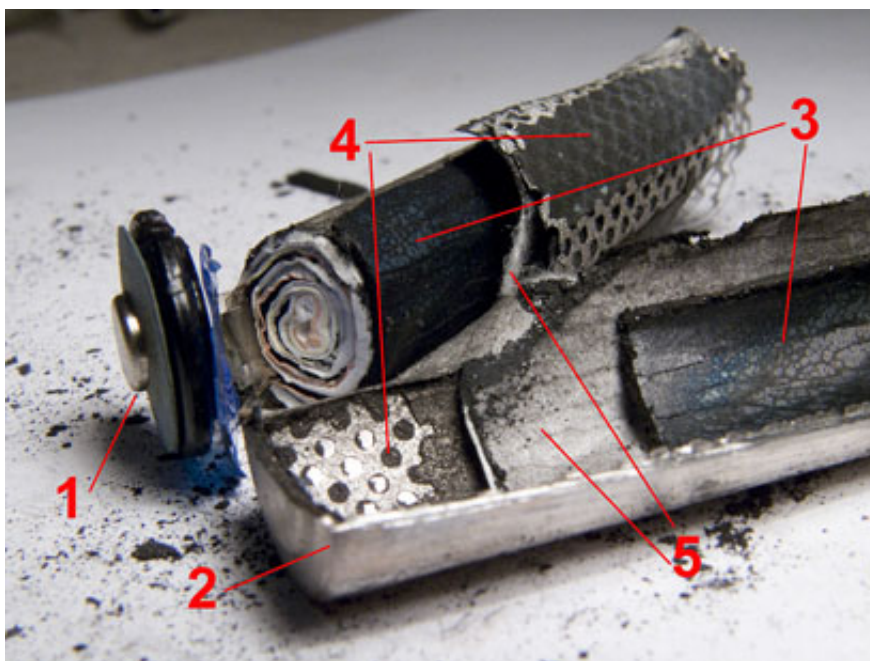
### 2.3.2 NiMH

NiMH, celým názvem nikl-metal hydridový akumulátor je v současnosti jedním z nejčastěji používaných akumulátorů. Vyrábí se v široké škále komerčně dostupných velikostí pro pohon každodenní elektroniky. Jeho předchůdce je NiCd (nikl-kadmiový akumulátor) se kterým má velmi podobné vlastnosti co se týče jmenovitého napětí (1,2 V), nabíjecí charakteristiky a podobně.

V tomto článku je kladná elektroda tvořena z oxidu-hydroxidu nikelnatého a záporná elektroda směsí niklu, kobaltu, manganu a některých vzácných kovů (lanthanu, ceru, neodymu apod.).

Konstrukce článku v provedení AA – lidově přezdívaného „tužková baterie“ je patrná z obrázku 2.6:(1: kladný pól, 2: kovový obal článku, zároveň záporný pól, 3: kladná elektroda 4: záporná elektroda s mřížkou sloužící jako sběrač proudu, 5: separátor mezi elektrodami.) [4]

Velkou nevýhodou dříve vyráběných článků bylo vysoké samovybíjení. Tento problém se již podařil speciálními výrobními technikami značně eliminovat a v současné době si je akumulátor schopen zachovat až 70% energie po pěti letech skladování. Tento technologický posun umožňuje použití nabíjecích akumulátorů i v aplikacích, kde to bylo dříve díky samovybíjení nepraktické. [20]



Obr. 2.6: Konstrukce Ni-MH článku

### 2.3.3 Li-ion

Lithium-iontový akumulátor je nejnovějším hojně používaným akumulátorem. Na rozdíl od předešle uvedených v sobě neobsahuje elektrolyt na vodní bázi, ale jde opět jako v případě lithiového primárního článku 2.2.4 o směs organických rozpouštědel a solí lithia. V současné době se v přenosných zařízeních, kde je kladen velký důraz na hmotnost a kapacitu, používá výhradně lithium-iontových článků, které vytlačily původně používané články NiMH či NiCd s mnohem nižší energetickou hustotou.

V současné době se nejčastěji používají akumulátory s kladnou elektrodou tvořenou sloučeninou kobaltitanu lithnytého ( $\text{LiCoO}_2$ ), případně sloučeninou  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . Druhé jmenované dosahují nižší kapacity, jsou ovšem schopny dodat mnohem vyšší proudy, čehož se využívá při použití v zařízeních s vysokým odběrem, kde nahrazují nikel-kadmiové akumulátory (ruční vrtačky, vysavače a podobně). [11]

Jmenovité napětí jednoho článku je 3,6 V, což přesně odpovídá třem NiCd či NiMH článkům v sériovém zapojení. Této „kompatibility“ se využívalo například u starších modelů mobilních telefonů (Nokia 5110, 3310), vybavených z výroby baterií tvořenou třemi NiMH články, do kterých bylo možné zakoupit baterii s vyšší kapacitou obsahující pouze jeden článek Li-ion.



Obr. 2.7: Li-ion článek Panasonic NCR18650

## 3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

### 3.1 Řady rezistorů

Všechny dále použité rezistory pocházejí z řady E12. Hodnoty součástek vycházejí z takzvaných vyvolených čísel. Mimo sady rezistorů se stejného řazení využívá pro odstupňování výkonu, počtu otáček, rozměrů, průměru, hmotností, drsností povrchu a podobné použití v technické praxi. Byla zvolena stupnice vyvolených čísel, která dělí interval 1 až 10 na  $6/12/24 \dots$  dílů. Řada těchto čísel tvoří přibližně geometrickou posloupnost a při zobrazení logaritmické stupnice bude jejich vzájemná vzdálenost přibližně stejná. Řady těchto vyvolených čísel se označují písmenem E a jsou definovány normou IEC 60063. V tabulce 3.1 je uvedena řada E12 ze které budeme používat veškeré rezistory a kondenzátory.[15]

Tab. 3.1: Řada E12

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 120 | 150 | 180 | 220 | 270 | 330 | 390 | 470 | 560 | 680 | 820 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

### 3.2 Komunikace

Jak již bylo zmíněno, mikrokontrolér podporuje sériovou komunikaci pomocí rozhraní USART. Jedná se o část integrovaného obvodu určenou pro sériovou komunikaci. Toto rozhraní je hojně využíváno v mikrokontrolérech pro komunikaci s dalšími jednotkami či pro komunikaci s PC jako v našem případě. Využívá tří vodičů – jeden pro odesílání, druhý pro příjem a třetí jako země. Jelikož toto rozhraní používá nejčastěji pouze napěťové úrovně 0 V až 3,3 V nebo 5 V, není vhodné pro přenosy na delší vzdálenosti vzhledem k velké pravděpodobnosti vzniku chyb. Na počítači jej proto v této podobě nenajdeme. Ačkoliv na počítačích najdeme rozhraní RS-232, přezdívané také sériová linka, které je velmi podobné - má shodné časování, ale jiné napěťové úrovně. Díky rozdílným úrovním ovšem není možné s mikrokontrolérem komunikovat přímo použitím RS-232 z počítače. Pro přímou komunikaci by bylo potřeba upravit napěťové úrovně, na což vznikla řada integrovaných obvodů, například oblíbený MAX232, který ke svojí funkci potřebuje pouze 5 V a připojení externích kondenzátorů. Bohužel v současné době se již RS-232 port přestává objevovat i u stolních počítačů, nehledě na notebooky, kam se neosazuje již delší dobu. Proto bylo potřeba přijít s nějakým jiným způsobem jak jednoduše komunikovat s využitím novějších rozhraní na moderních počítačích, jako je třeba USB. [26]

### 3.2.1 Převodníky USB - sériová linka

Jelikož přímá komunikace pomocí USB je složitější, často se využívá mikrokontrolér pracující se sériovou linkou v kombinaci k převodníkem na USB. Stejnou logiku zapojení využívá tento projekt. Jako převodník je možné vybrat z řady komerčních integrovaných obvodů, případně je možné zakoupit již kompletní desku s USB konektorem a kolíkovou lištou s výstupem potřebých napájecích napětí (obvykle 5 V, případně i 3,3 V z integrovaného lineárního stabilizátoru) a sériové linky. Při návrhu jsem měl k dispozici několik modelů převodníků:

#### **PL2303HX**

Prvním byl model PL2303HX od společnosti Prolific. Tento převodník podporuje USB 1.1, má 256bajtový buffer pro odesílání a přijímání. Podpora staršího USB 1.1 avšak není vzhledem ke zpětné kompatibilitě a používaným rychlostem na straně sériové linky nijak zásadní. Je kompatibilní jak s 3,3 V, tak 5 V úrovněmi sériové linky, vybaven interním 12MHz oscilátorem a možností připojení externího krystalu. Původní návrh obvodu je staršího data (rok 2005), avšak je pořád plně podporován ze strany výrobce. Ačkoliv například ve starších technických listech je uvedena podpora pro operační systémy Windows 98 až XP, na stránkách výrobce jsou dostupné ovladače a revizované technické listy uvádějící podporu i pro v současné době nejnovější systém Windows 8.1 v 32 nebo 64bitové variantě. Mimo klasické Windows (včetně serverových edicí) jsou dostupné ovladače pro Windows CE, Linux, Android i MAC OS 8/9/OSX. Minimálně v testovaném systému Windows 7 64bitová verze nebyly ovladače součástí systému a bylo je potřeba doinstalovat. Tento obvod jsem chtěl původně použít, ovšem jsem měl menší potíže týkající se ovladačů – v některých případech se stávalo, že odvodu nebylo přiřazeno číslo COM portu, ačkoliv bylo připojení počítačem detekováno. [22]

#### **FT232RL**

Druhý použitý model byl FT232RL od společnosti FTDI Chip. V praktických ohledech se od předchozích pro naše použití nijak výrazně neliší - je možné jej provozovat přímo od napětí 3,3 V až do 5,25 V. Na rozdíl od přechozího podporuje i nižší logické úrovně sériové linky 1,8 V a 2,8 V. Další výraznou změnou je integrovaná EEPROM paměť do které se dají uložit údaje o výrobci, jedinečné ID produktu, sériové číslo a další konfigurační informace pro USB rozhraní. U předchozího a následujícího modelu je možno tyto údaje uložit do připojené externí EEPROM. Bližší popis je uveden v katalogovém listě. [13]

## CP2102

Posledním testovaným převodníkem byl CP2102 od společnosti Silicon Labs. Principem funkce se velmi podobá přechozím obvodům. Všechny tři obvody obsahují integrovaný stabilizátor 3,3 V, model od Silicon Labs se vyrábí také v provedení se stabilizátorem nastaveným na 3,45 V. Na rozdíl od prvního uvedeného, je tento obvod kompatibilní s USB 2.0 a mírně se liší i dalšími parametry jako jsou vstupní a výstupní buffer - 576, respektive 640 bajtů. Další změnou je možnost napájení čistě z 3,3 V napájecí větve (dovolený rozsah je 3,0 V až 3,6 V) - je možné obejít vstupní stabilizátor 3,3 V ze kterého je celý obvod napájen. Při použití s klasickým USB z 5 V je ovšem potřeba zachovat zapojení s využitím stabilizátoru. Rozsah vstupních napětí je v tomto případě podle katalogového listu 4,0 V až 5,25 V. Pro tento model jsou k dispozici ovladače pro Windows XP až Windows 8.1, Windows CE, Linux i MAC OSX. Opět jako v případě předešlého modelu bylo potřeba na testovaném Windows 7 64bitové verzi doinstalovat ovladače ze stránek výrobce se kterými fungoval bez jakýchkoliv problémů. [24]

## Dostupnost

Společný problém těchto integrovaných obvodů je jejich dostupnost a také cena. Tím spíše pokud se do ceny musí započítat také mezinárodní poštovné, jelikož dostupnost těchto specializovaných obvodů je v obchodech působících v České republice problematická. První uvedený obvod PL2303HX jsem nebyl schopen v klasických obchodech se součástkami najít v nabídce. Druhý obvod, FT232RL je dostupný v kamenném obchodě GM Electronics za cenu 155 Kč. Poslední obvod (CP2102) má v nabídce společnost Farnell za cenu 95 Kč, ke které je třeba připočíst přibližně 150 Kč za poštovné.

Další, cenově přijatelnější variantou je objednání mimo obchody s elektronikou, přímo u čínských dealerů, mnohdy nabízejících poštovné zdarma i při koupi jednoho kusu. V tom případě vychází první obvod PL-2303 po přepočtu na přibližně 25 Kč, FT232RL na 50 Kč a poslední CP2102 můžeme sehnat za přijemných 40 Kč. V případě nákupu z těchto zdrojů je ovšem problematická doba doručení mnohdy přesahující 30 dní. Musíme také počítat s možností obdržení padělaných součástek, které nebudou splňovat všechny vlastnosti uváděné v katalogových listech. Proto bych se těmto zdrojům vyvaroval v případě konstrukce kritických komponent.

## Použitý model

Pro finální konstrukci měřiče jsem se rozhodnul pro řešení využívající již předpřipraveného modulu s integrovaným obvodem CP2102. Toto rozhodnutí vychází

z části ze skutečnosti, že při testování desky semestrálního projektu a také v první revizi desky, kde byl převodník připojován externě, se obvod osvědčil a nebyly s ním žádné problémy. Další aspekt výběru tohoto obvodu byl částečně z finančních důvodů – bylo paradoxně levnější objednat v zahraničí již hotový modul, než samotný obvod. Posledním významným aspektem použití již hotového modulu byla skutečnost, že obvod využívá velmi malé pouzdro QFN s 28 o rozměrech pouhých 5 mm s 28 pájecími ploškami, pro které by již mohly nastat problémy při výrobě DPS v použitém výrobním procesu.

### 3.3 Indikace

V zapojení jsou použity čtyři LED diody pro indikaci. První je jednoduše připojena na napájecí napětí přes  $1k\Omega$  rezistor na zem. Zbývající tři jsou každá připojena na jeden vývod mikrokontroléru, opět přes rezistor  $1k\Omega$  na zem. Funkcí těchto tří diod je indikovat obsluhu aktuální sepnutý vybíjecí proud – každá LED odpovídá jednomu z proudů, které je možné nastavit pro měření.

Pokud zanedbáme úbytek vzniklý na mikrokontroléru, vypočteme proud tekoucí LED diodami dle Ohmova zákona z rovnice 3.2. Napájecí napětí je 5 V, napětí na PN přechodu LED je dle katalogového listu 1,8 V. Rezistory byly zvoleny  $1k\Omega$ .

$$\begin{aligned} I &= \frac{U_{VSTUP} - U_{LED}}{R} \\ I &= \frac{5 - 1,8}{1000} \\ I &= 3,2 \text{ mA} \end{aligned} \tag{3.2}$$

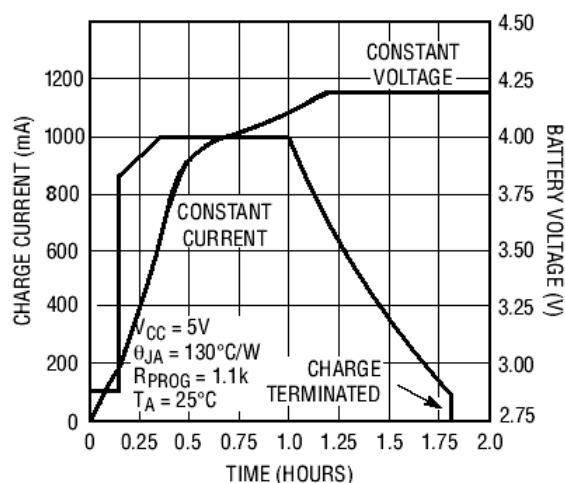
Postup výpočtu uvedený v rovnici 3.2 platí pro červené LED diody. V případě zelené LED indikující napájení bude proud nižší z důvodu vyššího napětí na PN přechodu zelené LED.

### 3.4 Napájení

Jelikož se jedná o zařízení pracující se sběrnici USB, bylo více než vhodné využít napájení, které tato sběrnice poskytuje. Z důvodu větší univerzálnosti a možnosti měření bez závislosti na připojeném PC jsem se rozhodl použít pro napájení Li-ion akumulátor typu 18650 s kapacitou přibližně 2000 mAh uvnitř přístroje, který se nabíjí po čas připojení přípravku k PC.

### 3.4.1 Nabíjení interního akumulátoru

Pro nabíjení interního akumulátoru byl použit integrovaný obvod TP4056. Jedná se o lineární nabíjecí obvod umožňující jednoduché zapojení vyžadující pouze minimum externích součástek pro nabíjení Li-ion v jednočlánkových aplikacích. Nabíjení probíhá metodou konstantní proud/konstantní napětí s možností volby proudu pomocí rezistoru. Rozsah vstupního napětí je od 4 V do 8 V, což jej předurčuje pro použití nejen s USB, ale také s jakýmkoliv zdrojem z tohoto rozsahu. Nabíjení je ukončeno, jakmile proud tekoucí do článku klesne na 10% nastavené počáteční hodnoty nabíjecího proudu. Obvod dále obsahuje výstup na LED diody indikující stav nabíjení a také ochranu proti přehřátí, kdy začne snižovat výstupní proud, aby nedošlo k překročení kritické teploty. Tato ochrana se uplatní hlavně v případě nabíjení zcela vybitého článku maximálním proudem, kdy rozdíl vstupního napětí a napětí článku v kombinaci s vysokým proudem způsobí vysokou výkonovou ztrátu na obvodu.



Obr. 3.3: Typický Průběh nabíjení metodou konstantní proud, konstantní napětí obvodem TP4056, převzato z [17]

### 3.4.2 Napájení obvodu

Vzhledem k tomu, že napětí na akumulátoru se pohybuje v rozmezí 3 V až 4,2 V, není možné toto napětí využít přímo – mikrokontrolér by nebyl schopen v tomto celém rozsahu správně pracovat. Z tohoto důvodu bylo nutné navrhnout zvyšující měnič na napětí 5V.

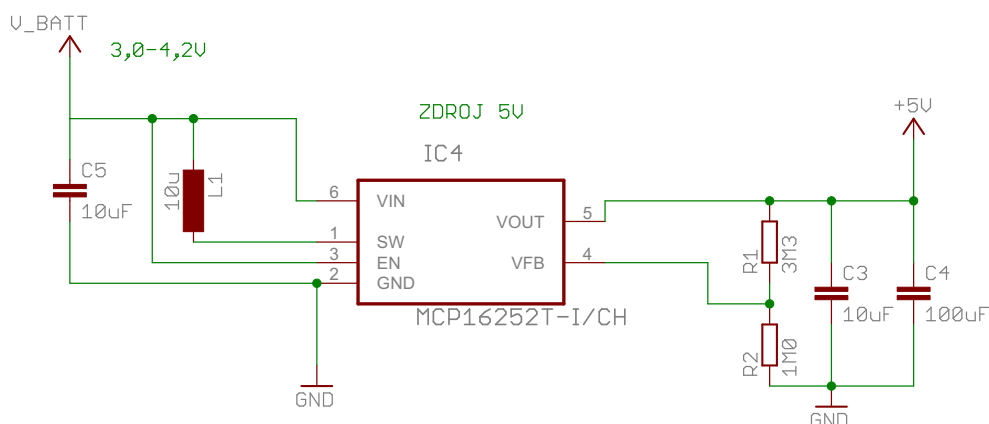
Pro tento účel byl zvolen integrovaný obvod MCP16251 od společnosti Microchip. Jedná se o jednoduchý nízkoproudový zvyšující měnič schopný při vstupním napětí

3,3 V poskytnout na výstupu až 225 mA při 5 V. Vzhledem k celkové spotřebě desky je tento proud naprosto dostatečný.

Jelikož je MCP16251 regulátor s nastavitelným výstupním napětím, je pro požadovaných 5 V nutné vhodně nastavit odporový dělič připojený do snímacího vstupu regulátoru.

$$V_O = V_{REF}(1 + R_2/R_1) \quad (3.4)$$

Dle katalogového listu je referenční napětí  $U_{REF}$  rovno hodnotě 1,23 V. Pokud vyjdeme z rezistorů dostupných v řadě E12 (3.1) a pro  $R_1$  zvolíme hodnotu 1 M $\Omega$ , vyjádřením  $R_2$  a dosazením do rovnice 3.4, dostaneme pro  $R_2$  hodnotu 3,065 M $\Omega$ , která však není z řady E12. Použijeme proto nejbližší vyšší hodnotu, 3,3 M $\Omega$ . Pokud nyní zpátky dosadíme hodnoty rezistorů do výchozí rovnice, vyjde nám výstupní napětí 5,29 V. Jelikož všechny součástky jsou schopny při tomto napětí bez problémů pracovat (nejdůležitější součástka, mikrokontrolér, má rozsah napájecích napětí 4,5 V až 5,5 V), tak se spokojíme s vypočtenou hodnotou. Můžeme také počítat s tím, že v zátěži dojde k určitému poklesu výstupního napětí.

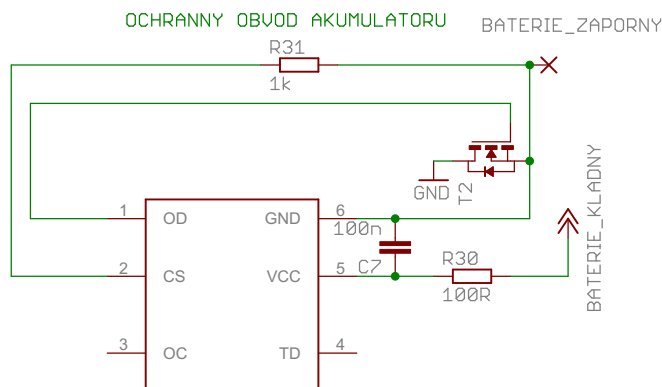


Obr. 3.5: Zapojení obvodu MCP16251

### 3.4.3 Ochranný obvod akumulátoru

Výše zmíněný regulátor má minimální vstupní napětí 0,35 V. Ačkoliv při tomto napětí již není schopný dodat dostatečný proud na výstupu, stále by na toto napětí byl schopný vybití interní akumulátor, což by pro něj bylo jistě fatální. Z tohoto důvodu byl osazen ochranný obvod zamezující přílišnému vybití akumulátoru. Jedná se o obvod DW-01, který monitoruje napětí na akumulátoru. Při poklesu napětí pod určitou úroveň (přibližně 2,5 V) dojde k odpojení zátěže. K tomu slouží unipolární

tranzistor zapojený mezi záporný pól akumulátoru a záporný pól spotřebiče (v tomto případě společnou zem zařízení). [12]



Obr. 3.6: Zapojení ochranného obvodu

## 3.5 Mikrokontrolér

Hlavním prvkem v zapojení je již zmíněný mikrokontrolér ATmega328P-PU, který se stará jak o spínání silových obvodů, tak o měření napětí a proudu. Pro správnou funkci bylo potřeba připojit externí 16MHz krystal a také dva kondenzátory mezi zemi a oba vývody krystalu. Byla použita doporučená hodnota 22 pF v SMD provedení v pouzdru 0805. Další nezbytnou součástí je rezistor zapojený mezi napájecí napětí a vývod číslo 1 mikrokontroléru. Jedná se o vývod RESET, který musí být v normálním provozním stavu udržován na logické úrovni 1. Pro tento účel není hodnota rezistoru kritická, byl použit standartní rezistor SMD 0805 s doporučenou hodnotou 10 k $\Omega$ . Vlastní spínání digitálních výstupů umožňuje zvolit ze tří proudů pro vybíjení daného článku. O problematice výběru výstupního proudu pojednává sekce 3.7.2.

### 3.5.1 Výběr paměti pro data

Naměřené hodnoty napětí se v první revizi desky ukládaly do integrované paměti v mikrokontroléru ATmega328, disponujícího 1024 bajty EEPROM. Při zachování maximálního rozlišení napětí z desetibitového AD převodníku bylo třeba pro každou měřenou hodnotu dvou bajtů. Z toho vyplývá, že počet naměřených hodnot mohl být nanejvýš 512. Z této hodnoty bylo také potřeba odečíst několik bajtů na servisní informace o uloženém počtu měření, nastaveném proudu a podobně. Využívat

pouhých přibližně 500 hodnot znamenalo odečítat hodnoty s velmi velký rozestupem – pokud bychom chtěli naměřit charakteristiku článku o kapacitě 3000 mAh proudem 100 mA, celkový čas měření by byl 1800 minut. To by znamenalo odečítat hodnoty přibližně pouze každé necelé čtyři minuty. Z důvodu požadavku na jemnější průběh měření byla zvolena externí EEPROM paměť s kapacitou 64 kB komunikující s mikrokontrolérem po sběrnici I<sup>2</sup>C. Do nyní nevyužívané interní paměti jsou ukládány servisní informace o nastaveném proudu a podobně.

### 3.5.2 Životnost paměti

Paměti EEPROM, stejně jako v současnosti používané paměti typu FLASH mají na rozdíl od operačních pamětí typu například SRAM omezený počet zápisů. Paměť v mikrokontroléru má garantovaný počet zápisů stanoven na 100000, za externí paměť jsem zvolil model 24LC512 od společnosti Microchip, kde se v katalogovém listě [16] dočteme o životnosti „více než milion zápisů“. Ačkoliv se milion zápisů zdá mnoho, katalogový list uvádí, že při zápisu po jednotlivých bajtech dojde při zápisu k přepisu celé stránky paměti (skupiny 128 bajtů). V praxi to znamená, že pokud zapisujeme poslední bajt v rámci jedné stránky, všechny paměťové buňky v dané stránce již byly přepsány 128násobně. Tím se efektivní životnost milionu přepisů sníží pouze na necelých 8000. V našem případě to znamená, že při nejhorší možné životnosti paměti dojde po 8000 spuštění měření k chybám a selhání zařízení. 8000 přepisů ovšem znamená, že kdyby se v průměru denně spouštěly dvě měření, k vyčerpání počtu přepisů dojde přibližně po deseti letech. Byla zvažována záměna paměti EEPROM za paměť typu FRAM, která má možný počet přepisů řádově vyšší – při uvažovaném zatížení dvou testů denně by teoreticky došlo k vyčerpání počtu zápisů za několik tisíciletí. Nakonec ale byla vzhledem k předpokládanému zatížení zvolena paměť EEPROM i přes výše uvedené nedostatky, jelikož její poměr cena/výkon je příznivější, nehledě na složitější dostupnost pamětí FRAM. V případě potřeby by bylo ovšem velmi jednoduché paměť zaměnit – vyrábí se ve variantě se stejným, pinově kompatibilním pouzdrem i adresováním.

## 3.6 Vstupní ochrana

Jelikož musíme počítat s určitou pravděpodobností, kdy obsluha zapojí měřený článek opačnou polaritou, bylo nutno vybavit zapojení ochranným obvodem zabráňujícím zničení nejen mikrokontroléru, ale i dalších komponentů v obvodu. V případě prepólování by se objevilo záporné napětí na AD převodníku mikrokontroléru, což by vedlo k jeho zničení – maximální dovolené záporné napětí na jakémkoliv vývodu mikrokontroléru je dle katalogového listu 0,5 V. Mimo to by začal

téct vysoký proud přes hlavní spínací tranzistor a snímací odpor, což by mohlo vést k jejich zničení v případě připojení článku s vysokým napětím a nízkým vnitřním odporem. [2]

Ochrana proti přepólování je řešena jednoduchým zapojením schottkyho diody a pojistky. Dioda je v normálním provozu v závěrném směru a neteče jí žádný proud. V případě přepólování se dioda otevře, začne jí téct vysoký proud daný pouze rozdílem napětí na připojeném článku, úbytku na diodě, vnitřním odporu článku a případně dalších parazitních impedancí. Schottkyho dioda byla zvolena z důvodu dosažení co nejnižšího napětí v propustném směru. Byla zvolena SMD varianta v pouzdře SMC se jmenovitým proudem 3 A. Špičkový proud může být ovšem několikanásobně vyšší, než dojde ke vlastnímu zničení součástky. Tento nárůst proudu způsobí přepálení pojistky a odpojení vstupu od měřicího přípravku. Po vyměnění pojistky bude obvod opět plně funkční.

Bohužel toto zapojení se v první revizi desky ukázalo jako problematické - při průtoku proudu vzniká na pojistce nezanedbatelný úbytek napětí, který způsobuje určitou chybu měření. Proto bylo zapojení lehce změněno. Stále je zde pojistka a výkonová dioda pro ochranu tranzistoru před přílišným proudem, ovšem měřené napětí musí být z důvodu snížení chyby připojeno přímo na vstupní svorky před pojistkou. Tím ovšem znovu získáme možnost záporného napětí na AD vstupech mikrokontroléru. Z tohoto důvodu bylo použito dalších (v normálním stavu) závěrně pólovaných schottkyho diod připojených ke vstupům AD převodníku. Jak je podrobněji rozepsáno v 3.8, AD převodník je připojen ke vstupnímu napětí přes odporový dělič - v případě přepólování vstupu poteče tudíž diodami pouze proud v jednotkách miliampérů daný vstupním napětím, úbytkem na diodě a hodnotou rezistoru v děliči.

## 3.7 Zdroj proudu

Pro vytvoření zdroje proudu bylo využito zapojení operačního zesilovače spolu s NPN tranzistorem. Operační zesilovač bylo potřeba vybrat takový, který umožňuje napájení pouze z kladného napětí kolem 5 V. V první revizi desky byl za konkrétní model byl vybrán velmi oblíbený obvod LM358 v provedení SMD v pouzdru SO8. Důvodem jeho oblíbenosti je mimo jiné i velmi nízká cena - necelé 3Kč. Později se ovšem ukázalo, že obvod nedosahuje očekávané proudové stability - při klesajícím napětí na vstupu (vybíjení měřeného článku) začal klesat i odebíraný proud, který by ovšem měl být konstantní. Pokud uvažujeme, že chceme článek vybíjet na napětí 0,9 V, bylo možné použít maximální vybíjecí proud pouhých 200mA, maximálně 300mA. Při vyšším proudu již docházelo ke snižování proudu v konečné fázi testu.

V zapojení tudíž byl otestován i jiný obvod, MCP602 se kterým již vše funguje dle předpokladů. Konkrétní naměřená proudová stabilita v závislosti na vstupním napětí je ukázána na grafu 4.5 v sekci věnované testování přístroje.

Zapojení využívá již dříve zmíněného snímacího odporu v cestě proudu tekoucího z emitoru tranzistoru. Tekoucí proud způsobí úbytek napětí daný Ohmovým zákonem. V tomto případě je použit rezistor o hodnotě 500 mΩ, tudíž na každých 100 mA tekoucího proudu vznikne úbytek 50 mV. Toto napětí je dále vedeno do invertujícího vstupu operačního zesilovače. Do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače je přivedeno napětí z děliče určujícího zvolený proud. Z principu funkce operačních zesilovačů v tomto zapojení vyplývá, že rozdíl napětí mezi diferenčními vstupy má být ideálně nulový, čehož se snaží tento obvod docílit. Při přivedení nenulového napětí na neinvertující vstup dojde ke zvýšení napětí na výstupu OZ, který je připojen na bázi výkonového tranzistoru. Zvýšení napětí způsobí zvýšení proudu tekoucího do báze tranzistoru. Proud tekoucí bázi tranzistoru vyvolá tok kolektorového proudu vynásobený činitelem zesílení  $h_{FE}$ . Operační zesilovač je schopen poskytnout na svém výstupu proud až 30 mA. Výpočet maximálního proudu tranzistorem je uveden v rovnici 3.7 ze známého proudu OZ ( $I_{OZ}$ ) a zesilovacího činitele tranzistoru  $h_{FE}$ , který odečteme z grafu v katalogovém listě. [27] [25]

$$\begin{aligned} I_T &= I_{OZ} \cdot h_{FE} \\ I_T &= 30 \cdot 50 \\ I_T &= 1500 \text{ mA} \end{aligned} \tag{3.7}$$

Za hlavní tranzistor byl v testovací revizi desky zvolen model BD243C, jehož výrobcem je STMicroelectronics. Tento model patří mezi základní typy NPN tranzistorů v pouzdře TO220. Výhoda použití tohoto pouzdra spočívá v případné jednoduché montáži na chladič při vybíjení vysokými proudy v kombinaci s vybíjením článků s vyšším svorkovým napětím. Maximální ztrátový výkon na tranzistoru vznikne při vybíjení plně nabitého článku Li-ion, u kterého může maximální napětí dosáhnout až 4,2V. Maximální výkonovou ztrátu na tranzistoru můžeme vypočítat dle rovnice 3.8.

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \\ P &= 4,2 \cdot 0,5 \\ P &= 2,1 \text{ W} \end{aligned} \tag{3.8}$$

Ve skutečnosti bude ztrátový výkon o něco nižší - ačkoliv plně nabitý běžný Li-ion článek může mít teoreticky uvedených 4,2V, napětí při zátěži poklesne a dále

bude klesat s postupným vybíjením měřeného článku. Je však dobré počítat s nejhorší možnou variantou pro zachování dostatečné rezervy. Další úbytek vznikne na snímacím rezistoru, přírodních vodičích, pojistce, přechodových odporech a podobně. [25]

### 3.7.1 Zdroj nastavovacího napětí

Jak již bylo výše zmíněno, operační zesilovač porovnává napětí ze snímacího rezistoru s napětím určujícím výsledný proud. Toto napětí vzniká na odporovém děliči, kde jsou čtyři rezistory, každý z jednoho výstupu mikrokontroléru, připojeny do společného uzlu s pátým rezistorem zapojeným na zem. Napětí vzniklé na společném uzlu těchto rezistorů je přiváděno na vstup operačního zesilovače. V první revizi desky bylo použito dalších napěťových referencí starajících se o konstantní napětí na vstupu odporového děliče. Toto zapojení bylo potřeba z důvodu napájení měřiče přímo ze sběrnice USB, kde napětí může kolísat v rozsahu 4,75 V až 5,25 V. V současné verzi, kde se o stabilní napětí stará spínaný regulátor to již není potřeba a můžeme využít výstupní napětí přímo z vývodů mikrokontroléru.

### 3.7.2 Princip výběru proudu

Princip zapojení je následující: všechny čtyři vývody mikrokontroléru jsou skrze diody zapojeny do série s vždy jinou hodnotou rezistoru do společného uzlu, tvořícího s pátým uzemněným rezistorem odporový dělič. Kdyby nebyla umístěna dioda v sérii s mikrokontrolérem, docházelo by při sepnutí jednoho výstupu k toku proudu zpět do aktuálně vypnutého výstupu mikrokontroléru, jelikož je na něm udržována logická nula. Tento tekoucí proud by měl za následek ovlivnění výsledného napětí a znemožnil by nastavení přesného proudu.

### 3.7.3 Výpočet děliče

Z dostupného výstupního napětí je nyní třeba vhodným nastavením vytvořit napětí odpovídající požadovanému proudu, kterým bude tento přípravek vybíjet připojené články. Při zvoleném snímacím odporu o hodnotě  $500\text{ m}\Omega$  připadá na každých  $100\text{ mA}$  proudu řídicí napětí  $50\text{ mV}$ . Dále máme stanoveno, že přípravek bude schopen vybíjet s nastavenými proudy  $100\text{ mA}$ ,  $250\text{ mA}$  nebo  $500\text{ mA}$ . Nyní tudíž zbývá vypočítat vhodné hodnoty rezistorů pro zadané proudové rozsahy.

Společnému rezistoru byla přiřazena hodnota  $1\text{ k}\Omega$  z důvodu minimalizace počtu rozdílných součástí - tato hodnota je na desce přípravku již několikrát použita. V tomto okamžiku je třeba provést hrubý výpočet hodnot rezistorů pro získání požadovaného napětí, který provedeme ze vztahu 3.9.

$$U_{\text{výst.}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{vst.}} \quad (3.9)$$

Po úpravě a dosazení získáme požadovanou hodnotu rezistoru  $R_1$ .

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_2 \cdot U_{\text{vst.}}}{U_{\text{výst.}}} - R_2 \\ R_1 &= \frac{1000 \cdot 5}{0,05} - 1000 \\ R_1 &= 99 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3.10)$$

Obdobný výpočet provedeme pro druhou a třetí hodnotu proudu – tedy napětí 100 mV (3.11.), respektive 250 mV (3.12.).

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_2 \cdot U_{\text{vst.}}}{U_{\text{výst.}}} - R_2 \\ R_1 &= \frac{1000 \cdot 5}{0,125} - 1000 \\ R_1 &= 39 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_2 \cdot U_{\text{vst.}}}{U_{\text{výst.}}} - R_2 \\ R_1 &= \frac{1000 \cdot 5}{0,25} - 1000 \\ R_1 &= 19 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3.12)$$

Jak plyne z výpočtů výše, požadujeme hodnoty nenacházející se v řadě E12. Z tohoto důvodu bylo nutné výsledné hodnoty vytvořit paralelní kombinací několika rezistorů. Neméně důležitý je také fakt, že ve výpočtech neuvažujeme úbytek na diodách, vycházíme z teoreticky přesného napětí 5 V a neuvažujeme nepřesnosti výroby, tvořící u použitých rezistorů až 5%. Z těchto důvodů bylo pro finální kalibraci využito měření hodnoty vybíjecího proudu multimetrem a současné přidávání rezistorů s vysokými hodnotami pro dosažení co nejmenšího rozdílu mezi nastavenou a skutečnou hodnotou proudu.

### 3.8 Snímání napětí a proudu

Odečet napětí na měřeném článku je prováděn pomocí AD převodníku použitého mikrokontroléru. V základním zapojení je jako reference pro AD převodník využito napájecího napětí 5 V, tudíž v tomto stavu by bylo bez problému možné připojit měřené napětí přímo na analogový vstup. Ovšem vzhledem k hlavnímu požadavku –

měření článků o napětí kolem 1,5 V by bylo použití reference 5 V zbytečné plýtvání přesností měření – bylo proto využito interní reference 1,1 V v mikrokontroléru. Tento krok ovšem znamená, že nejvyšší možné měřené napětí AD převodníkem je pouhých 1,1 V. [2] V tomto případě je opět referenční napětí nižší než požadované měřené i v případě článků s napětím 1,2 V. Z tohoto důvodu je vstupní měřené napětí přivedeno na odporový dělič.

Jak již bylo zmíněno, požadujeme co nejvyšší přesnost při měření článků s napětím okolo 1,5 V. Ovšem na druhou stranu také vyžadujeme měření Li-ion článků s napětím až 4,2 V. Z tohoto důvodu bylo pro zachování co nejvyšší přesnosti měření využito dvou odporových děličů – každý do jednoho vstupu AD převodníku. Každý dělič je nastaven tak, aby při maximálním napětí daných článků bylo na vstupu AD převodníku napětí blížící se 1,1 V. V případě měření článků s vyšším napětím je na druhém děliči napětí vyšší než referenční – to ovšem vadí pouze z hlediska naměření nesmyslných hodnot. K poškození AD převodníku dojít nemůže, dokud vstupní napětí nepřekročí přibližně 7 V. Volbu správného portu AD převodníku provede software podle nastavených údajů o měření.

Pro výpočet odporových děličů děliče budeme uvažovat, že na analogovém vstupu smí být při vstupním napětí 4,2 V, respektive 1,8 V, maximálně hodnota referenčního napětí – 1,1 V. Ve druhém případě požadujeme 1,8 V z důvodu možnosti měření lithiových článků, u kterých napětí naprázdno může dosáhnout až takto vysoké hodnoty.

Požadovanou hodnotu vypočteme dle vztahu 3.9. Hodnotu rezistoru R<sub>2</sub> zvolíme 100 kΩ a dopočítáme hodnotu R<sub>1</sub>. Po úpravě a dosazení získáme požadovanou hodnotu rezistoru R<sub>1</sub>. V tomto případě je vypočtená hodnota z rovnice 3.13 **nejnižší** hodnotou, kterou je možné bezpečně použít.

$$\begin{aligned} R_1 &> \frac{R_2 \cdot U_{\text{vst.}}}{U_{\text{výst.}}} - R_2 \\ R_1 &> \frac{1000000 \cdot 4,2}{1,1} - 1000000 \\ R_1 &> 282 \text{ k}\Omega \end{aligned} \tag{3.13}$$

Pro praktické zapojení zvolíme tudíž hodnotu 330 kΩ, dostupnou z řady E12. [15]. Obdobně vypočteme hodnotu pro druhý dělič

$$\begin{aligned} R_1 &> \frac{R_2 \cdot U_{\text{vst.}}}{U_{\text{výst.}}} - R_2 \\ R_1 &> \frac{100000 \cdot 1,8}{1,1} - 100000 \\ R_1 &> 63,6 \text{ k}\Omega \end{aligned} \tag{3.14}$$

Opět zvolíme vhodnou hodnotu z řady E12. [15]. V tomto případě 68 k $\Omega$ . Důvod použití takto vysokých hodnot je požadavek na co nejnižší proud tekoucí děličem – v opačném případě by při připojení měřeného článku tekla proud daný celkovým odporem děličů i při vypnutém měření. V krajním případě by tento proud mohl způsobit podvybití a zničení připojeného akumulátoru po ukončení měření.

## 3.9 Metodika měření

### 3.9.1 Měření vnitřního odporu

Pro měření vnitřního odporu je možno použít řadu metod. V tomto případě je měření prováděno stejnosměrnou metodou, při které se zjišťuje pokles napětí při zatížení článku určitým proudem po dobu přibližně 100 ms. Oproti jednoduchému měření rozdílu napětí článku naprázdno a v zátěži byla zvolena metoda využívající dvou rozdílných zatěžovacích proudů – článek je nejprve po dobu přibližně 20 ms zatížen malým proudem, přibližně 20 mA. Po uplynutí 20 ms je změřeno napětí a sepnut hlavní zatěžovací proud o hodnotě přibližně 750 mA. Po uplynutí dalších 100 ms je zátěž odpojena a proběhne další odečet napětí. Rozdíl obou naměřených napětí je spolu se zatěžovacím proudem použit pro výpočet vnitřního odporu dle Ohmova zákona. [10]

### 3.9.2 Měření kapacity

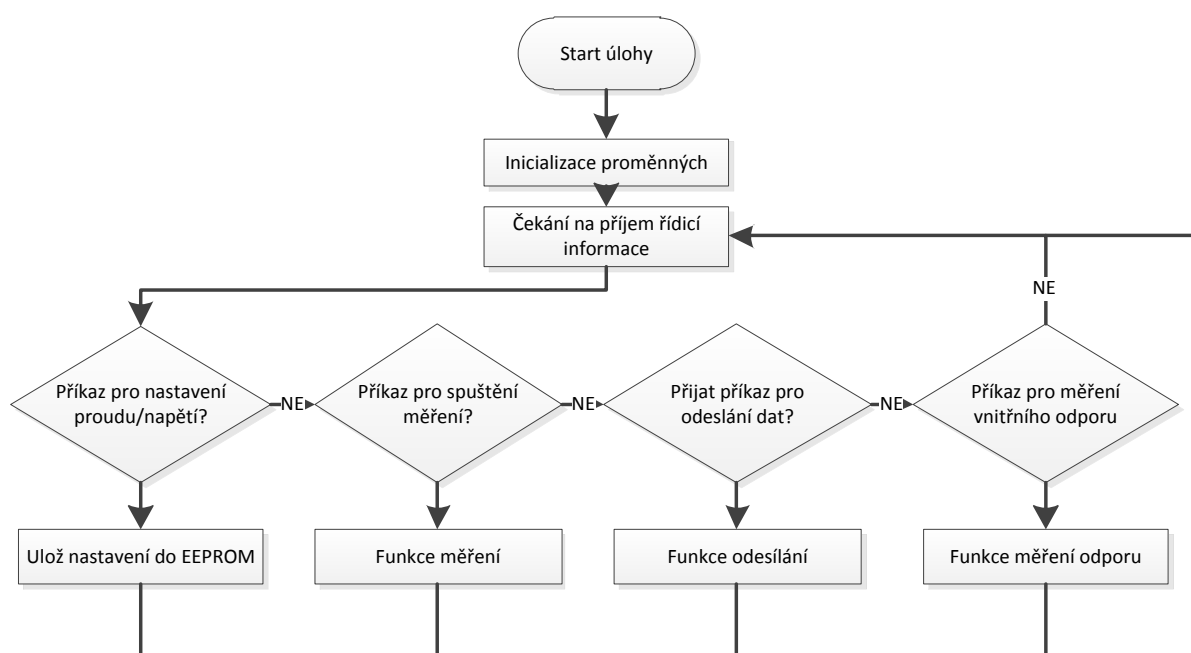
Vlastní měření kapacity probíhá zatížením článku konstantním proudem o známé hodnotě a měřením času než článek dosáhne zvoleného minimálního napětí. Pro účely testu bylo zvoleno napětí 3,0 V pro Li-ion články a 0,9 V pro ostatní články (alkalické, zinko-uhlíkové, lithiové a NiMH). Nabíjecí NiMH článek byl nabit nabíječem Maha C9000 a před provedením testů ponechán vždy 24 hodin v klidu.

Během testů teplotní závislosti kapacity byla snaha o udržení co nejstabilnější teploty článků během vybíjení. Pro testy při pokojové teplotě bylo využito aktivní chlazení ventilátorem v místnosti s teplotou okolo 23° C. Pro testy za snížené teploty bylo opět využito chlazení ventilátorem v chladicím boxu, kde byla celou dobu udržována teplota v rozmezí 9-11° C. Pro testy při extrémně nízkých teplotách (−20° C) již nebylo možné využít ventilátor vzhledem ke zvýšení viskozity oleje v ložiscích a jeho zadření. Články byly proto uvnitř mrazicího boxu ponořeny v nádobě s ethanolem o objemu přibližně 1 l, který sloužil jako chladicí médium. Vzhledem ke své relativně vysoké měrné tepelné kapacitě a velkému objemu chladiva nedocházelo k jejich výraznějšímu ohřevu.

## 3.10 Návrh a implementace software

Program pro mikrokontrolér byl napsán ve vývojovém prostředí Arduino IDE s využitím programovacího jazyku pro Arduino. Jedná se o jazyk vycházející z jazyka Wiring, který původně vznikl pro vývojový kit podobný Arduino a založený na dalším open source projektu Processing. Jedná se o jazyk velmi podobný C++, nebo spíše jakási vylepšená sada maker nad C++.[23]

Vlastní program běží v nekonečné smyčce, kdy čeká na příjem řídicích informací z PC. Poté dojde ke spuštění jednotlivých funkcí programu, jak je zřetelné z vývojového diagramu. 3.15



Obr. 3.15: Vývojový diagram programu

### 3.10.1 Princip měření

#### Studený start

Při zapnutí zařízení dojde k inicializaci proměnných, nastavení stavu portů (vstupní/výstupní) a načtení knihoven pro komunikaci pomocí I<sup>2</sup>C s EEPROM pamětí. Dále dojde k inicializaci sériové komunikace a čekání na příchozí data z PC.

## Komunikace s PC

Řízení přípravku příkazy z PC je řešeno sekvencí bajtů, kdy každý znamená jeden příkaz a podle přijaté hodnoty dojde k provedení příslušné operace. Při požadavku na spuštění měření z PC se odešle sekvence tří bajtů – první nastaví vybraný vybíjecí proud, druhý nastaví napětí, při kterém dojde k odpojení zátěže a ukončení měření. Hodnoty napětí a proudu se uloží do EEPROM, aby mohly být později odeslány zpět do PC a došlo ke správnému vyhodnocení kapacity a vykreslení hodnot do grafu. Třetím bajtem dostane měřič příkaz pro spuštění vlastního měření. Komunikace probíhá pomocí sériové linky rychlostí 9600 bitů za sekundu.

| Hodnota bajtu [HEX] | Znak v ASCII | Příkaz                                   |
|---------------------|--------------|------------------------------------------|
| 0x21                | !            | příkaz uvozující naměřené hodnoty        |
| 0x23                | #            | příkaz uvozující měření vnitřního odporu |
| 0x31                | 1            | začni odesílat obsah paměti              |
| 0x32                | 2            | spust' měření                            |
| 0x33                | 3            | změň vnitřní odpor                       |
| 0x41                | A            | nastav konečné napětí na 0,9 V           |
| 0x42                | B            | nastav konečné napětí na 3,0 V           |
| 0x61                | a            | nastav proud 100 mA                      |
| 0x62                | b            | nastav proud 250 mA                      |
| 0x63                | c            | nastav proud 500 mA                      |

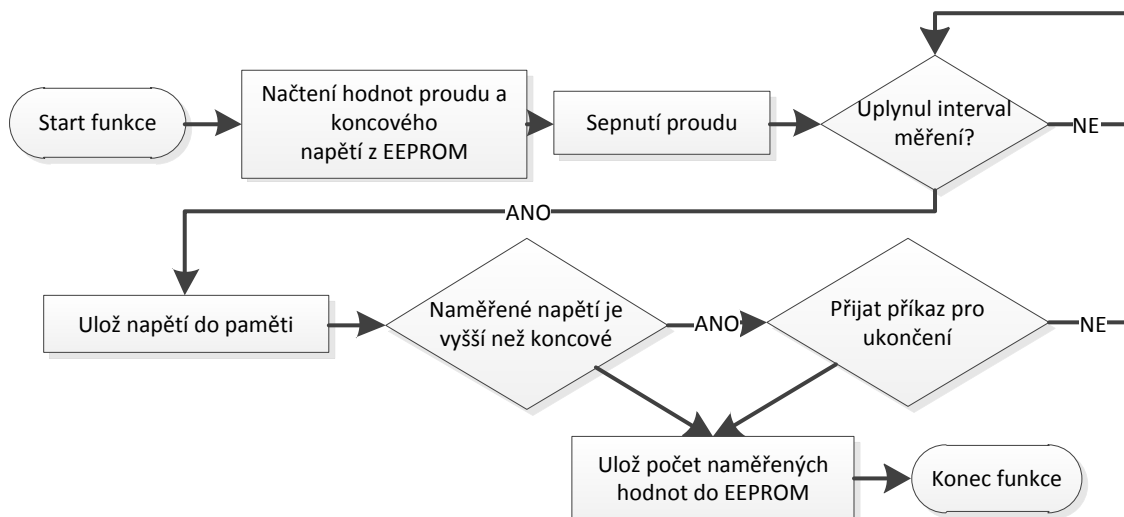
Tab. 3.16: Význam řídicích bajtů

Po odeslání řídicího bajtu 0x21 jsou odeslány dva bajty obsahující surovou naměřenou hodnotu z AD převodníku. Podobně je tomu v případě bajtu 0x23 uvozujícího měření vnitřního odporu – v tomto případě je odeslán ve dvou bajtech rozdíl napětí a výsledný proud. Hodnoty řídicích bajtů byly zvoleny z důvodu snadného ovládání přímo z terminálu v průběhu programování – odpovídají totiž běžným znakům a tak bylo možné jednoduše posílat příkazy i bez dokončeného programu na PC.

## Vlastní měření

Po zavolání funkce pro měření dojde k načtení hodnoty konečného napětí z EEPROM, dále se z EEPROM načte také hodnota zvoleného proudu pro měření. Poté se podle načtené hodnoty proudu vyberou vhodné výstupy mikrokontroléru, na které se přivede napětí. Více informací o principu proudového zdroje lze nalézt výše.( 3.7)

Dalším krokem je již samotné odečtení hodnoty napětí z AD převodníku. Než k tomu dojde, je nutné vybrat, ze kterého vstupu se bude napětí odečítat – v za-



Obr. 3.17: Vývojový diagram funkce měření

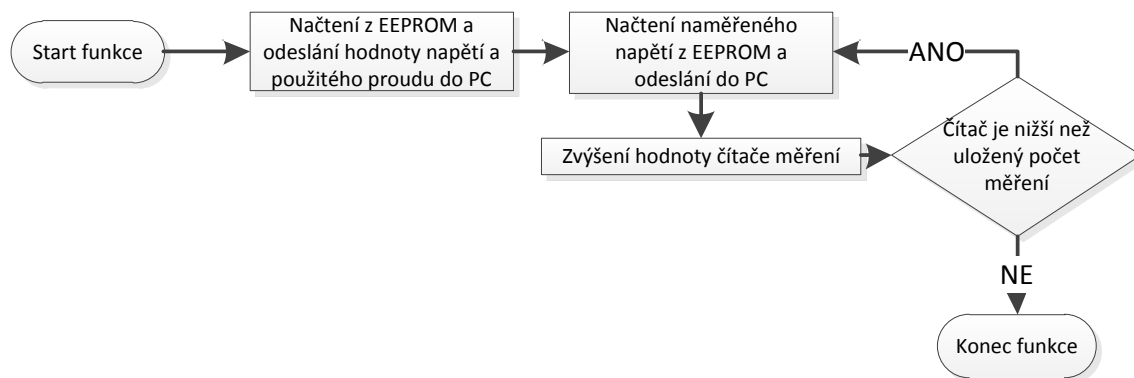
pojení jsou použity dva odporové děliče, aby bylo možné měřit články s různým svorkovým napětí bez nutnosti obětovat velkou část přesnosti integrovaného desetibitového AD převodníku při měření článků s nižším napětím. Pro tento výběr se využije hodnota nastaveného konečného vybíjecího napětí – budeme předpokládat, že při vybíjení do hodnoty 3,0 V se jedná o Li-ion akumulátor, který dosahuje napětí až 4,2 V a využijeme vstup s vyšším dělicím poměrem. Analogicky k tomu budeme při vybraném konečném napětí 0,9 V předpokládat že se jedná o typ článku (nejčastěji alkalický nebo NiMH), který dosahuje napětí maximálně 1,8 V a použijeme vstup s dělicím poměrem nižším.

V další fázi dojde k zapsání naměřené hodnoty do EEPROM. Jelikož AD převodník je desetibitový, je potřeba naměřené napětí rozdělit do dvou bajtů. Dále se tato naměřená hodnota odešle na sériový port do PC. Nyní dojde k čekání po nastavený interval mezi měřeními (5 sekund) a dále ke zvýšení čítače počtu měření a porovnání odečteného napětí v předchozím kroku s konečným napětím uloženým v paměti. K zastavení měření dojde také při překročení maximálního počtu měření (32760) nebo po přijetí řídicích dat z PC. Pokud jsou splněny podmínky pro pokračování, opakuje se celý cyklus znovu. V opačném případě dojde k zapsání počtu měření do EEPROM, vypnutí indikačních LED a proudového zdroje a k navrácení do hlavní smyčky programu, ve které se vyčkává na příjem řídicích informací z PC.

### Načtení hodnot z paměti do PC

Po tom co máme data z ukončeného měření v paměti zařízení, je možné přejít k jejich odeslání do PC. K tomu opět dojde po přijetí řídicího příkazu, na základě

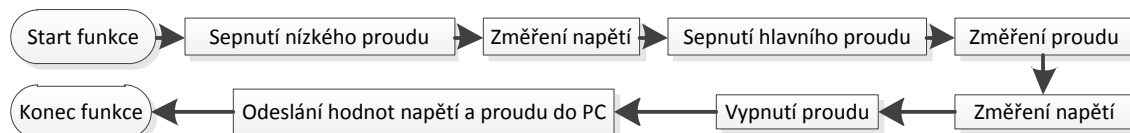
kterého zařízení odešle do PC informace o použitém proudu a konečném napětí. Poté dojde k postupnému čtení EEPROM paměti, při kterém je její obsah odeslán do PC. Vždy při tom dojde k porovnání hodnoty uloženého počtu měření a zvýšení čítače již odeslaných dat. Jakmile jsou tyto hodnoty shodné, dojde k ukončení odesílání a návratu do hlavní smyčky programu.



Obr. 3.18: Vývojový diagram funkce odeslání naměřených hodnot do PC

### Měření vnitřního odporu

Po přijetí požadavku na změření vnitřního odporu článku dojde nejprve k sepnutí nízké proudové zátěže (přibližně 10mA), odečtení napětí a dále k sepnutí všech proudových výstupů, což vyústí ve vybíjecí proud přibližně 750mA. Hodnota proudu je následně odečtena jako úbytek napětí na snímacím rezistoru. Odečtení skutečné hodnoty proudu je nutné pro případy, kdy by tekoucím proudem došlo k takovému poklesu napětí článku, kdy by již měřič nebyl schopen odebírat stabilní proud a došlo by k jeho poklesu. V tom případě by bylo měření zatížené velmi velkou chybou, jelikož pro výpočty by byla předpokládána hodnota 750 mA, avšak skutečná by mohla být mnohem nižší. Po sepnutí proudu je dále provedeno další měření napětí a vypnutí všech proudových výstupů. Následně dojde k odeslání hodnoty proudu a rozdílů napětí bez zátěže a se zátěží do PC. Následuje opět návrat do hlavní smyčky programu.



Obr. 3.19: Vývojový diagram funkce měření vnitřního odporu článků

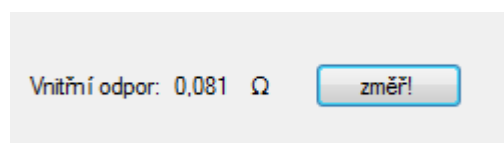
### 3.11 Software na straně PC

Obslužný program na PC byl vytvořen s využitím Visual C++. Jedná se o jednoduché rozhraní navržené pro nastavení parametrů měření – výběr proudu a nastavení koncového napětí, při kterém dojde k ukončení měření. Program dále zobrazuje graf průběhu napětí v čase a to buď živě při měření, nebo po načtení měřených hodnot z paměti měřiče.

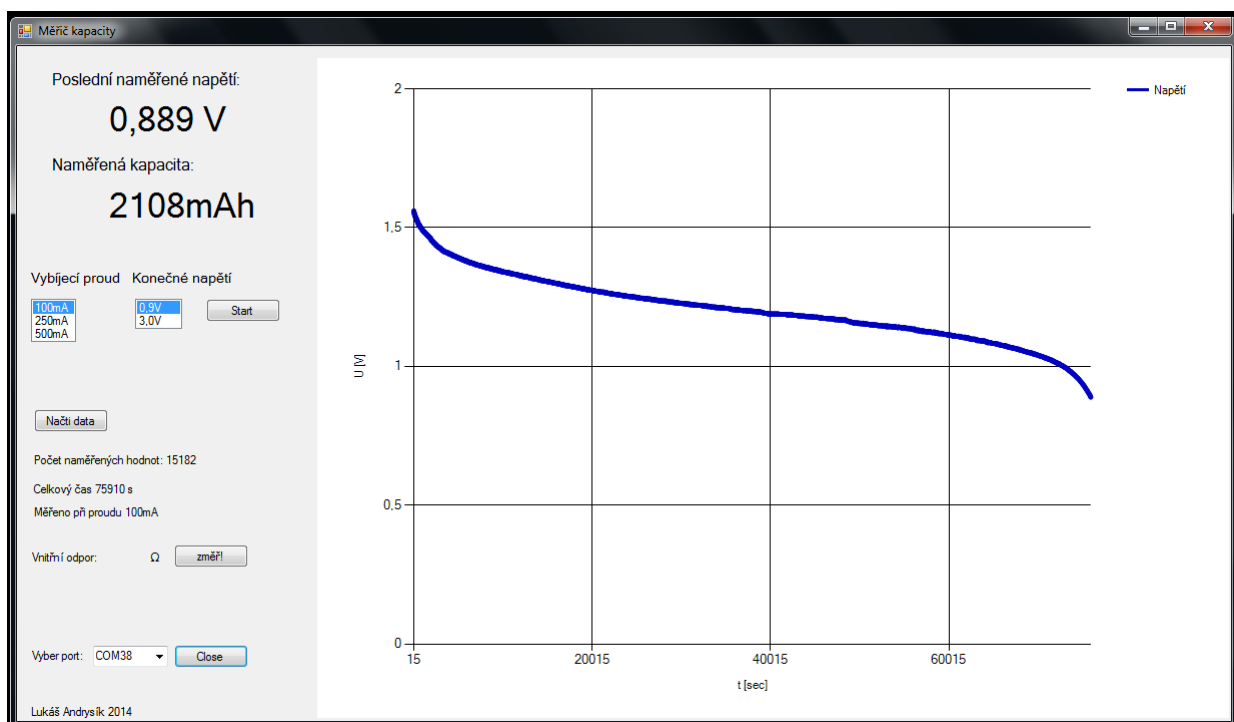
Po spuštění programu je provedeno načtení všech dostupných COM portů v systému a jejich zobrazení v tabulce. Po výběru a otevření zvoleného portu dojde k odblokování dalších ovládacích prvků. Po tomto kroku je možné začít komunikovat s přípravkem a zasílat do něj požadavky na provedení daného úkolu. První důležitou funkcí je spuštění měření – k tomu slouží seznamy „vybíjecí proud“ a „konečné napětí“. Po výběru požadovaných hodnot a kliknutí na tlačítko „Start“ dojde k odeslání sekvence bajtů značících přípravku požadavek pro nastavení proudu, konečného napětí a příkaz pro spuštění měření. V tomto okamžiku se čeká na příchozí data z měřiče a následně dojde k postupnému přidávání naměřených hodnot do grafu. Zároveň je také přehledně zobrazováno poslední naměřené napětí, celková doposud článku odebraná kapacita, počet měření a celkový čas.

Při požadavku na načtení již naměřených hodnot z paměti dojde po kliknutí na tlačítko „Načti data“ k odeslání řídicího bajtu s požadavkem na odeslání dat - zařízení následně odešle všechna relevantní data z paměti a v software dojde postupně k vykreslení grafu a výpisu stejných informací jako při probíhajícím měření.

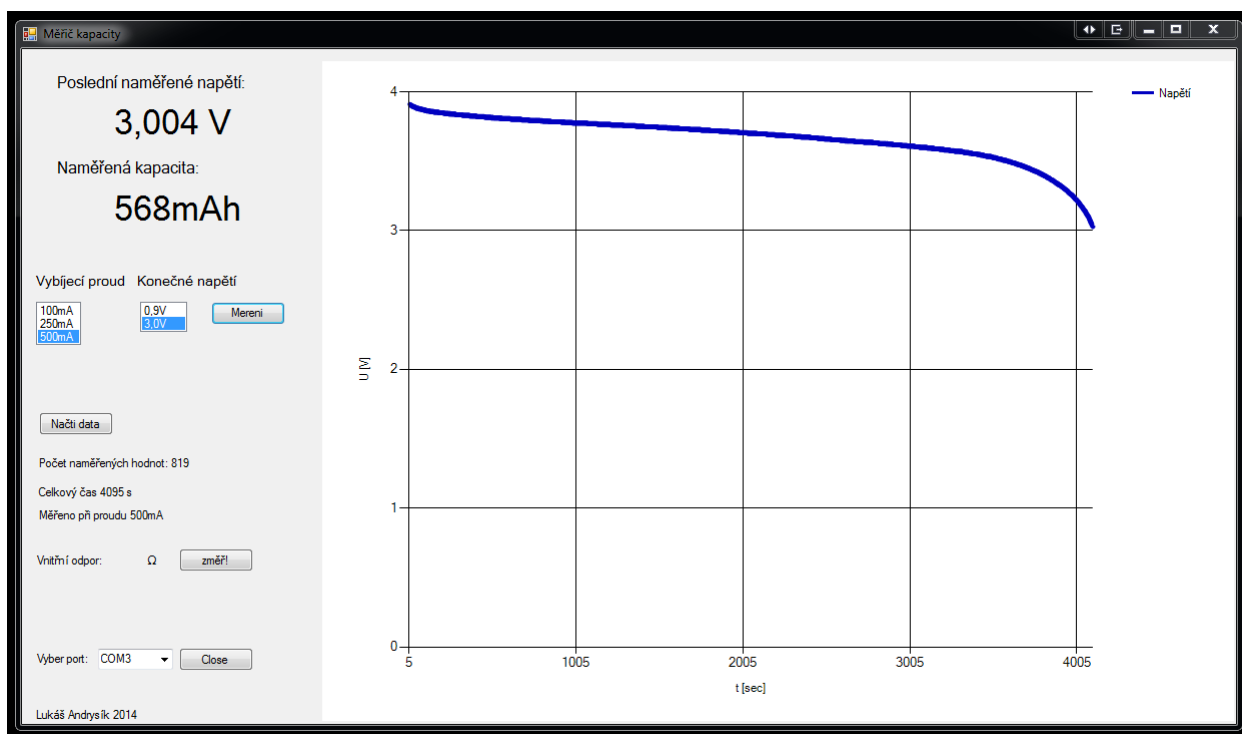
Poslední funkcí programu je měření vnitřního odporu – po stisknutí tlačítka „Změř“ dojde k odeslání požadavku na měření vnitřního odporu článku. Přípravek následně odpoví s hodnotami napětí a proudu, ze kterých dojde k výpočtu vnitřního odporu a jeho vypsání.



Obr. 3.20: Ukázka funkce měření vnitřního odporu



Obr. 3.21: Obslužný program na PC s výsledkem měření článku AA



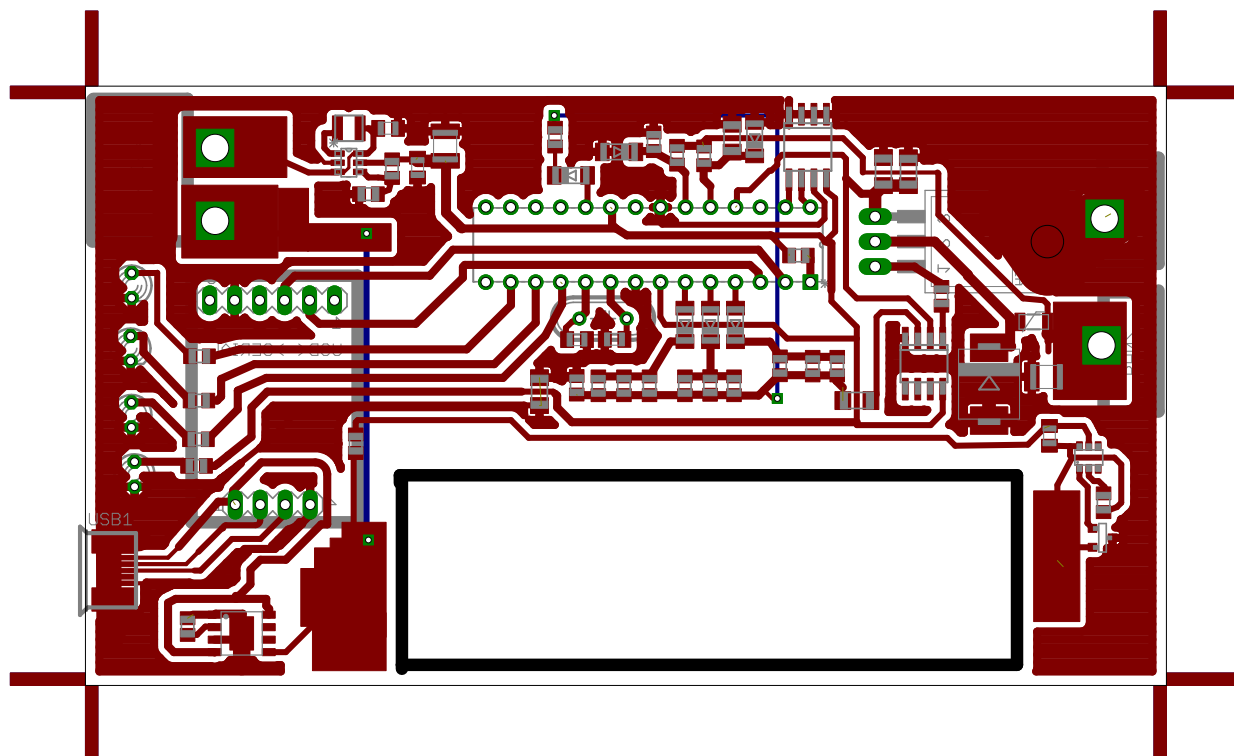
Obr. 3.22: Obslužný program na PC s výsledkem měření článku Li-ion

## 4 KONSTRUKCE

### 4.1 Výroba DPS

#### 4.1.1 Návrh desky plošných spojů

Návrh DPS byl proveden v programu Eagle. Obvod byl navržen pro jednostrannou desku z důvodu snadné domácí výroby. Výsledný návrh je uveden na obrázku.



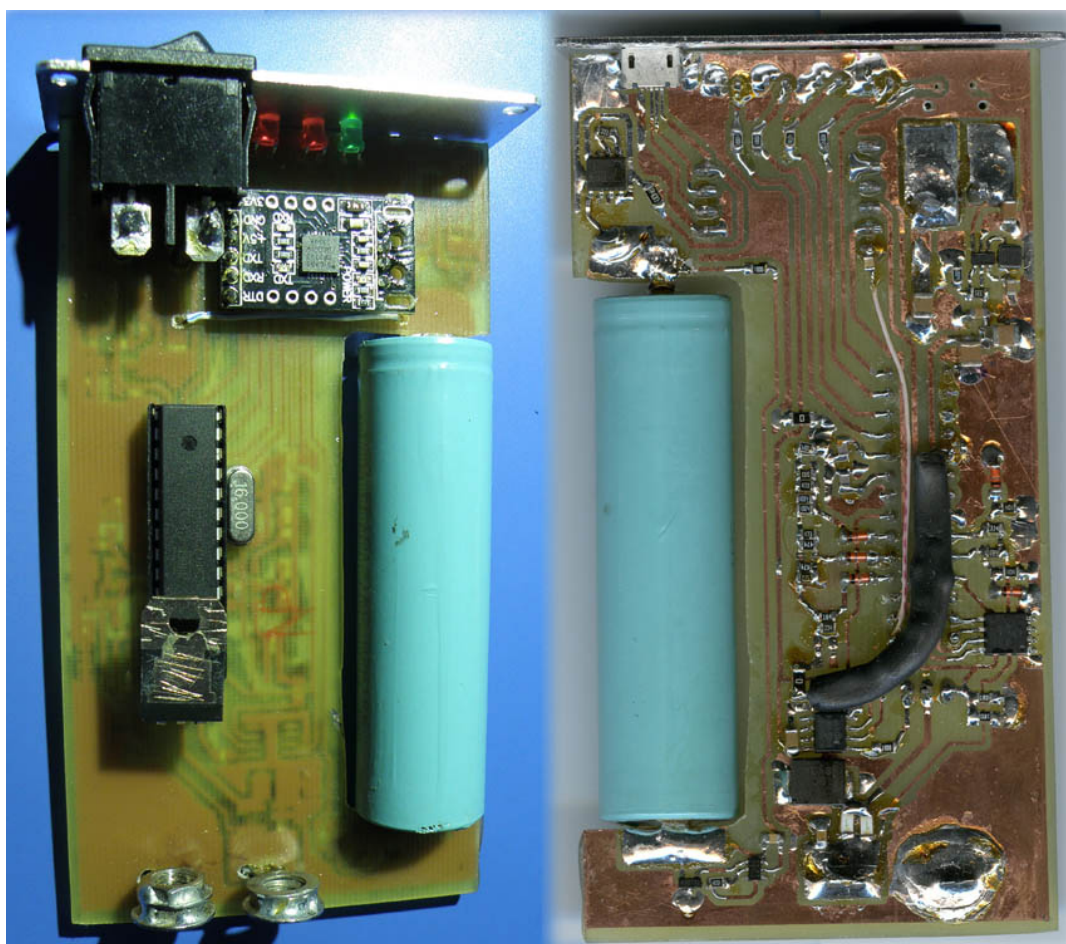
Obr. 4.1: Finální podoba DPS

#### 4.1.2 Vlastní výroba DPS

Pro výrobu DPS byla zvolena technika pozitivní fotoemulze. Jedná se o leptuvzdornou vrstvu pokrývající měděný povrch plošného spoje. V místech, kde je tato vrstva vystavena světlu se po vyvolání v roztoku hydroxidu sodného fotoemulze smyje a odkryje tak měděný povrch, který dále může reagovat s leptacím přípravkem. Fotoemulze se dá zakoupit jako samostatný roztok ve spreji, případně jsou v prodeji již předpřipravené polotovary DPS s průmyslově nanesenou vrstvou.

## Postup výroby DPS

1. Úprava zakoupeného polotovaru desky na vhodnou velikost
2. Tisk předlohy na průsvitný papír a její umístění na polotovar DPS
3. Osvit DPS s předlohou UV světlem
4. Vyvolání fotoemulze v roztoku hydroxidu sodného
5. Leptání v roztoku peroxidu vodíku a kyseliny chlorovodíkové
6. Vizuální kontrola vodivých spojů a jejich případná oprava
7. Vrtání děr pro součástky s drátovými vývody
8. Zabroušení hran desky a její úprava na finální velikost
9. Odstranění zbytků fotoemulze acetonem
10. Nanesení vrstvy roztoku kalafuny v acetonu pro zabránění oxidace desky
11. Osazení většiny pasivních součástek
12. Osazení napájecího a nabíjecího obvodu a kontrola jejich správné funkce
13. Osazení citlivých součástek (mikrokontrolér, operační zesilovač, EEPROM)
14. Osazení mechanicky náročných součástek (LED, konektory, vypínač)

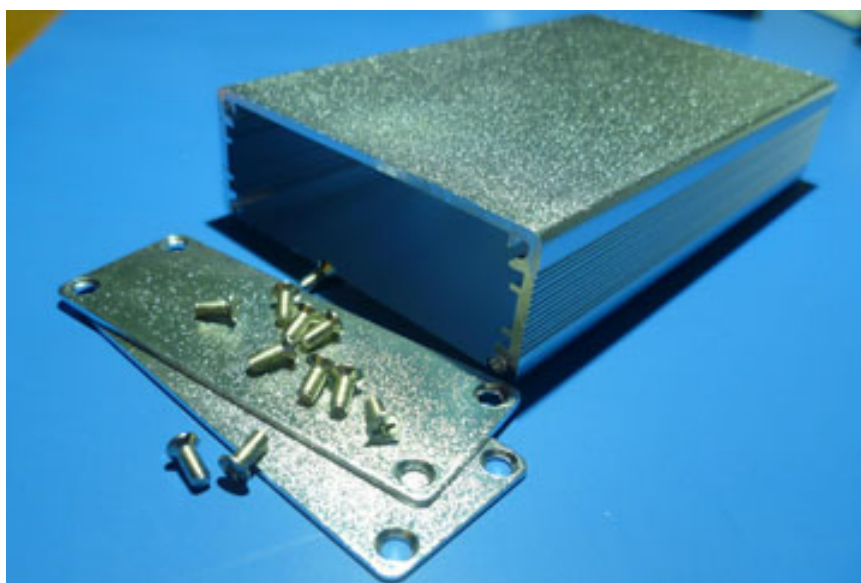


Obr. 4.2: Fotka desky zařízení, vrchní a spodní pohled

## 4.2 Mechanická konstrukce

### 4.2.1 Výběr krabičky

Pro další používání měřicího přípravku bylo potřeba jej umístit do vhodné krabičky – jak z důvodu estetických, tak pro zajištění mechanické ochrany elektroniky před vnějšími vlivy. Při výběru materiálu krabičky bylo vybíráno mezi plastem a kovem. Jelikož daný přípravek není považován za přenosné zařízení, a tudíž není třeba řešit co nejnížší hmotnost, byl pro výrobu zvolen jako materiál kov. Konkrétní krabička je vyrobena z 1,6 mm tlustého hliníku a působí bytelným dojmem. Mimo výhod zmíněných výše je velmi dobře využitelná pro odvod tepla vzniklého na regulačním tranzistoru. Pro finální konstrukci byla zakoupena krabička s označením DIY1065 o vnitřních rozměrech 20,5x60,5x110 mm. Uvnitř také obsahuje drážky pro uchycení DPS. Jedinou nutnou úpravou bylo vytvoření otvorů v předním a zadním panelu pro uchycení indikačních diod a konektorů.



Obr. 4.3: Zakoupená konstrukční krabička

### 4.2.2 Odvod tepla

Jak již bylo výše zmíněno, použitím hliníkové krabičky se velmi zjednoduší chlazení celého přípravku. V praxi je jediným významným zdrojem odpadního tepla regulační tranzistor. Jak bylo vypočteno v rovnici 3.8, maximální ztrátový výkon je 2,1 W. Ačkoliv je to hodnota relativně nízká, pouhé pouzdro TO220 bez připojení na chladič by se při tomto výkonu již zahřívalo na nebezpečně vysoké teploty. Na druhou stranu z estetických důvodů bylo nežádoucí vrtání do kovové krabičky. Dalším

aspektem pro neinvazivní způsob přenosu tepla je fakt, že by bylo nutné zajistit elektrickou izolaci tranzistoru a krabičky. Byl proto zvolen kompromis v podobě teplovodivé gumy, která vyplňuje mezeru mezi pouzdem tranzistoru a stěnou krabičky. Tento způsob chlazení není vhodný pro vysoké výkony, ovšem pro pouhé 2,1 W je v našem případě naprosto dostatečný.

## 4.3 Ověření funkčnosti

### 4.3.1 Energetická náročnost

Po finálním sestavení a kalibraci přípravku bylo provedeno měření energetické náročnosti zařízení v provozu. Byl měřen proud z vestavěného akumulátoru při napětí 3,7 V a vybíjení článku o napětí 1,5 V.

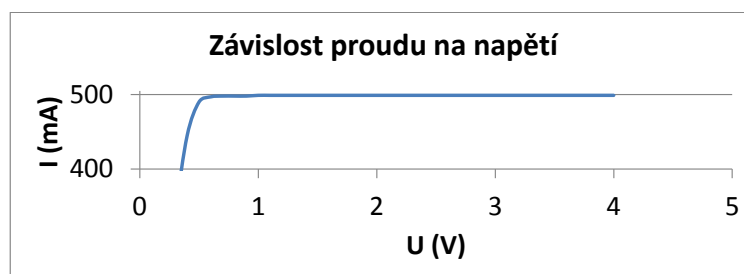
| Stav zařízení   | Proudový odběr [mA] |
|-----------------|---------------------|
| Nečinný         | 24                  |
| Vybíjení 100 mA | 32                  |
| Vybíjení 250 mA | 36                  |
| Vybíjení 500 mA | 43                  |

Tab. 4.4: Proudová náročnost přípravku

Jak můžeme vidět, je proudová náročnost zařízení velmi nízká – kapacita vestavěného akumulátoru je přibližně 2000 mAh, což znamená až 62 hodin měření při 100 mA na jedno nabití.

### 4.3.2 Ověření proudové stability

Z grafu 4.5 je zřetelně vidět, že zvolený proud 500 mA je v celém rozsahu provozního napětí velmi stabilní a měření tudíž nebude případnou nestabilitou ovlivněno.



Obr. 4.5: Závislost proudu na vstupním napětí

## 5 MĚŘENÍ

Jakmile byla ověřena základní funkce měřicího přípravku, rozhodl jsem se udělat řadu testů na několika běžně dostupných nabíjecích i nenabíjecích článcích velikosti AA a sledovat jejich kapacitu v různých situacích. Do testu byly zahrnuty články zinko-uhlíkové, alkalické, dva kusy lithiových a pro srovnání jeden nabíjecí NiMH. Cílem testu bylo také zjistit, jak velké rozdíly jsou mezi dražšími značkovými články a nejlevnější konkurencí.



Obr. 5.1: Články v testu

| Název               | technologie | hmotnost [g] | cena za kus [Kč] |
|---------------------|-------------|--------------|------------------|
| Tesco Battery       | Zn-C        | 14,5         | 6,3              |
| Varta Superlife     | Zn-C        | 16,9         | 10,0             |
| Varta Longlife      | Alkalický   | 23,3         | 10,0             |
| Tesco Power         | Alkalický   | 23,6         | 11,3             |
| GP Ultra            | Alkalický   | 23,0         | 12,5             |
| Energizer powerseal | Alkalický   | 22,9         | 18,8             |
| Varta High Energy   | Alkalický   | 23,3         | 25,0             |
| Energizer Maximum   | Alkalický   | 24,2         | 29,0             |
| GP Lithium          | Lithiový    | 14,8         | 44,5             |
| Energizer Lithium   | Lithiový    | 14,7         | 55,0             |
| Sanyo Eneloop       | NiMH        | 26,0         | 65,0             |

Tab. 5.2: Seznam článků v testu

Jak je již z tabulky 5.2 zřejmé, jsou v článcích kromě pořizovací ceny velké rozdíly i v hmotnosti – nejnižší vykazují články lithiové, nejvyšší naopak nabíjecí NiMH.

## 5.1 Srovnání vnitřního odporu

Prvním měřením bylo provést test vnitřního odporu u všech článků při různých teplotě. Jak je všeobecně známo, snížením teploty dojde ke zpomalení chemických dějů, což v případě článků vede ke změnám jejich charakteristických vlastností jako je například vnitřní odpor. Jak je již z tabulky 5.3 zřetelné, jsou ve vnitřním odporu velké rozdíly mezi jednotlivými technologiemi, naproti tomu rozdíly mezi články v rámci jedné technologie při daných podmínkách již většinou nejsou nikterak zásadní. Zajímavý je nižší vnitřní odpor u článku Energizer Powerseal ve srovnání s ostatními alkalickými. Nejlepší výsledky při velmi nízkých teplotách naopak podaly články Varta High Energy a Varta Longlife (paradoxně nejlevnější alkalický článek v testu).

Jinými články naprosto nedosažitelné hodnoty vykazuje nabíjecí NiMH Sanyo Eneloop, který i při nízké teplotě prokázal velmi nízký vnitřní odpor a v tomto testu překonal i velmi drahé primární lithiové články.

| Název               | technologie | $R_i(23\text{ }^{\circ}\text{C})\text{ }[\Omega]$ | $R_i(10\text{ }^{\circ}\text{C})\text{ }[\Omega]$ | $R_i(-20\text{ }^{\circ}\text{C})\text{ }[\Omega]$ |
|---------------------|-------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Tesco Battery       | Zn-C        | 0,43                                              | 0,51                                              | 1,40                                               |
| Varta Superlife     | Zn-C        | 0,35                                              | 0,43                                              | 1,50                                               |
| Varta Longlife      | Alkalický   | 0,16                                              | 0,20                                              | 0,32                                               |
| Tesco Power         | Alkalický   | 0,16                                              | 0,20                                              | 0,42                                               |
| GP Ultra            | Alkalický   | 0,16                                              | 0,20                                              | 0,52                                               |
| Energizer Powerseal | Alkalický   | 0,12                                              | 0,16                                              | 0,50                                               |
| Varta High Energy   | Alkalický   | 0,14                                              | 0,17                                              | 0,30                                               |
| Energizer Maximum   | Alkalický   | 0,16                                              | 0,21                                              | 0,47                                               |
| GP Lithium          | Lithiový    | 0,35                                              | 0,50                                              | 1,20                                               |
| Energizer Lithium   | Lithiový    | 0,18                                              | 0,26                                              | 0,64                                               |
| Sanyo Eneloop       | NiMH        | 0,03                                              | 0,04                                              | 0,06                                               |

Tab. 5.3: Srovnání vnitřního odporu článků

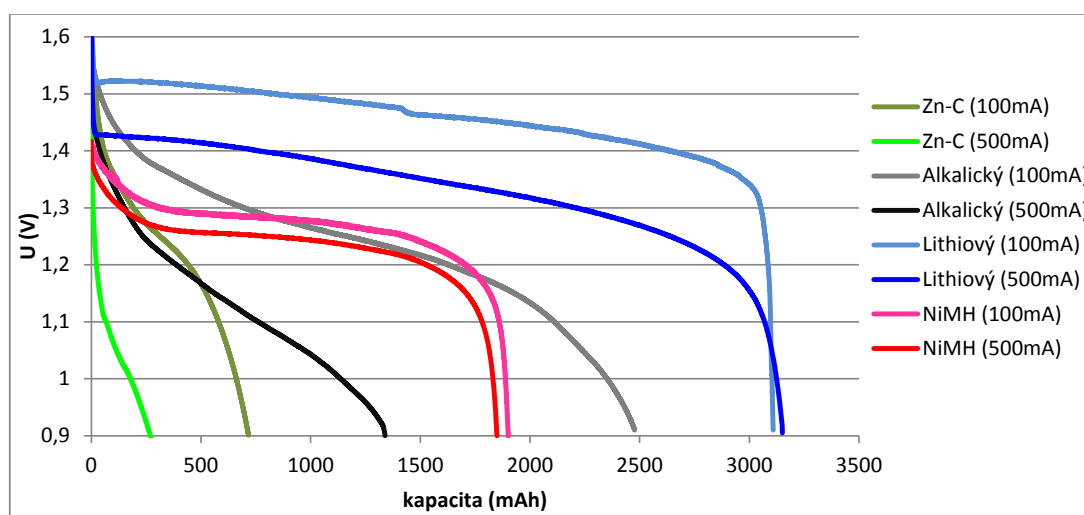
Jak již bylo zmíněno v 3.9, vnitřní odpor je vypočten jako pokles napětí při změně zátěže z 10 mA na 750 mA. Použití metody dvou proudů namísto rozdílu hodnoty naprázdno a v zátěži přispělo ke stabilnějším hodnotám při opakovaných měřeních.

## 5.2 Měření kapacity při různých proudech

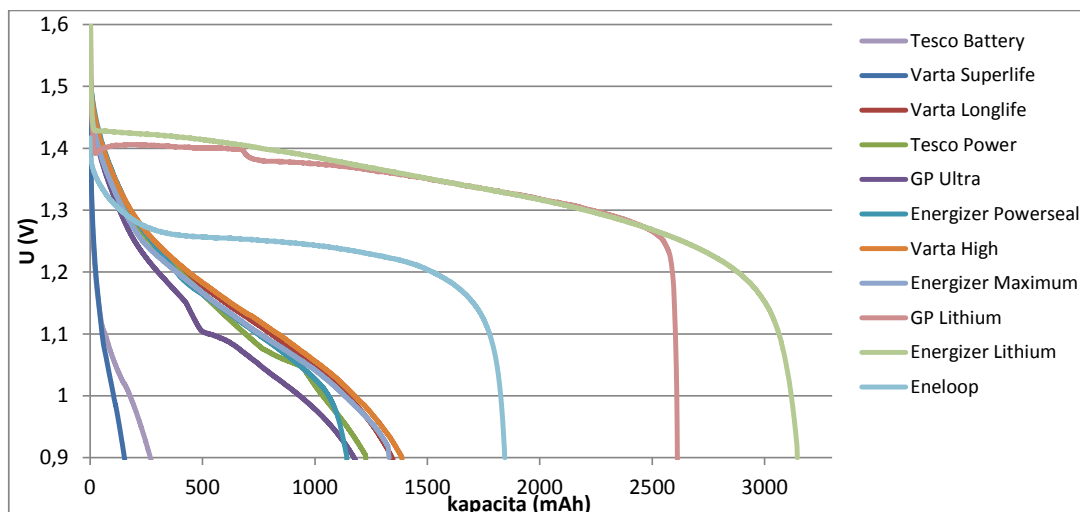
Dalším důležitým krokem ke srovnání článků bylo provést měření kapacity při různých proudech. Ačkoliv přípravek umí proudy 100 mA, 250 mA a 500 mA, bylo z časových i ekonomických důvodů provedeno měření pouze nejvyšším a nejnižším možným proudem.

| Název               | technologie | Kapacita (100 mA)<br>[mAh] | Kapacita (500 mA)<br>[mAh] |
|---------------------|-------------|----------------------------|----------------------------|
| Tesco Battery       | Zn-C        | 707                        | 269                        |
| Varta Superlife     | Zn-C        | 579                        | 152                        |
| Varta Longlife      | Alkalický   | 2295                       | 1330                       |
| Tesco Power         | Alkalický   | 2345                       | 1209                       |
| GP Ultra            | Alkalický   | 2298                       | 1165                       |
| Energizer Powerseal | Alkalický   | 2295                       | 1126                       |
| Varta High Energy   | Alkalický   | 2482                       | 1368                       |
| Energizer Maximum   | Alkalický   | 2472                       | 1329                       |
| GP Lithium          | Lithiový    | 2890                       | 2611                       |
| Energizer Lithium   | Lithiový    | 3108                       | 3143                       |
| Sanyo Eneloop       | Ni-MH       | 1880                       | 1851                       |

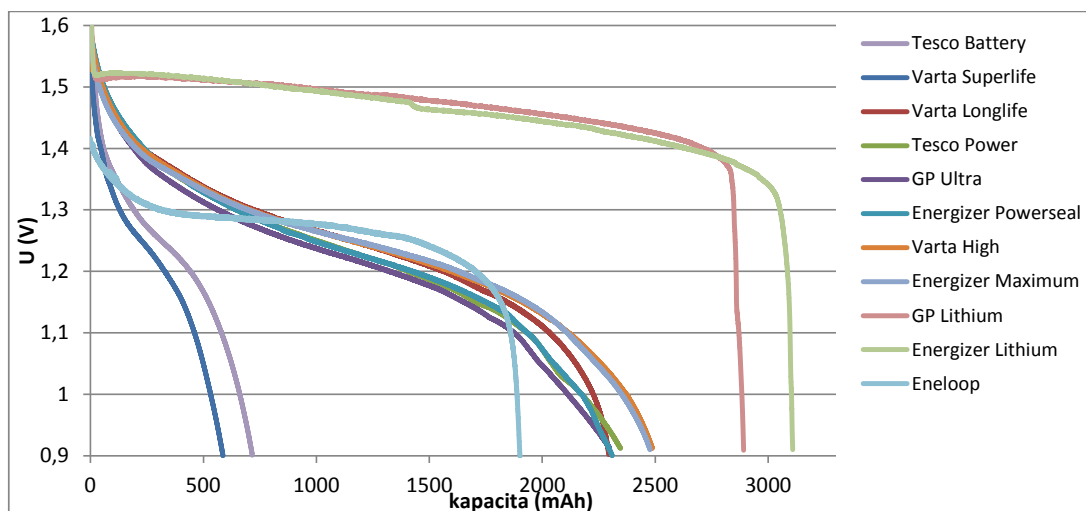
Tab. 5.4: Srovnání kapacity článků při různých proudech



Obr. 5.5: Průběh napětí vybraných článků při různých proudech



Obr. 5.6: Průběh napětí článků při vybíjecím proudu 500 mA



Obr. 5.7: Průběh napětí článků při vybíjecím proudu 100 mA

Na grafu 5.5 můžeme vidět průběh napětí na vybraných článcích (Tesco Battery, Energizer Maximum, Energizer Lithium, Eneloop) při obou vybíjecích proudech. Na grafech 5.6 a 5.7 můžeme pozorovat průběhy napětí při zátěži 500 mA, resp. 100 mA. Při porovnání různých typů článku můžeme vidět, že rozdílný vybíjecí proud má téměř zanedbatelný vliv na lithiový a NiMH článek – při obou měřeních dosáhly téměř stejné kapacity. U nižšího proudu je u lithiového pouze strmější pokles napětí v konečné fázi měření. Naprosto jiná situace je zřetelná u alkalických článků. Při snížení vybíjecího proudu dojde k velmi výraznému nárůstu kapacity – při 500 mA se kapacita pohybuje pouze okolo 1300 mAh, v 100 mA testu již vykázaly hodnoty okolo 2400 mAh, čímž dokonce překonaly v kapacitě nabíjecí NiMH.

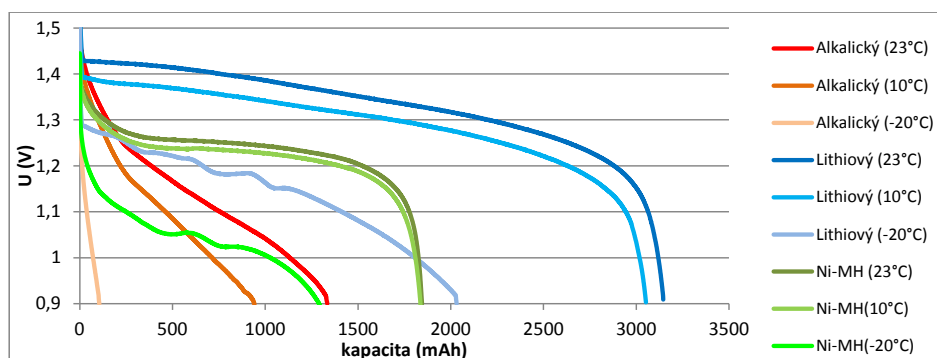
### 5.3 Měření kapacity při různých teplotách

Poslední měření mělo za účel zjistit rozdíly v kapacitě článků při různých teplotách. Měření probíhaly při pokojové teplotě (23°C), v chladu (10°C) a v mrazu (−20°C) při proudu 500 mA.

| Název               | Kapacita (23°C)<br>[mAh] | Kapacita (10°C)<br>[mAh] | Kapacita (−20°C)<br>[mAh] |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Tesco Battery       | 269                      | 46                       | 0                         |
| Varta Superlife     | 152                      | 62                       | 0                         |
| Varta Longlife      | 1330                     | 884                      | 96                        |
| Tesco Power         | 1209                     | 829                      | 75                        |
| GP Ultra            | 1165                     | 653                      | 50                        |
| Energizer powerseal | 1126                     | 708                      | 101                       |
| Varta High Energy   | 1368                     | 861                      | 107                       |
| Energizer Maximum   | 1329                     | 938                      | 102                       |
| GP Lithium          | 2611                     | 2699                     | 0                         |
| Energizer Lithium   | 3143                     | 3052                     | 2029                      |
| Sanyo Eneloop       | 1851                     | 1836                     | 1277                      |

Tab. 5.8: Srovnání kapacity článků při různých teplotách

Pro přehlednější zobrazení v grafu byly vybrány 3 články – jako zástupce alkalických článků Energizer Maximum, dále Energizer Lithium a nabíjecí Ni-MH Sanyo Eneloop. Graf 5.6. zobrazuje průběh napětí těchto tří článků při různých teplotách.



Obr. 5.9: Průběh napětí článků při různých teplotách

Jak můžeme jasně vidět, rozdíl mezi pokojovou teplotou a chladem má minimální vliv na Ni-MH článek, ovšem na alkalickém článku je již vidět rozdíl značný. Zásadní rozdíly ovšem můžeme pozorovat při velmi nízké teplotě – všechny typy vykázaly výrazné snížení kapacity.

## 5.4 Závěry měření

Výsledky provedených měření dokazují, že rozdíly mezi nejdražšími a levnějšími alkalickými články jsou z hlediska kapacity a vnitřního odporu minimální. Na druhou stranu nemůžeme vyloučit rozdíly, které nebylo možné v této práci posoudit – například rychlost samovybíjení či těsnost obalu po delší době v provozu.

Velmi zásadní rozdíly ovšem pozorujeme mezi jednotlivými technologiemi – zinko-uhlíkové články vykázaly v testech velmi špatné parametry, ať už se jedná o kapacitu při obou zatěžovacích proudech, hodnoty vnitřního odporu nebo kapacitu při snížené teplotě. Při  $-20^{\circ}\text{C}$  dokonce selhaly úplně a po připojení zátěže kleslo jejich napětí okamžitě pod 0,9 V.

Oba testované lithiové články vykázaly velmi vysokou kapacitu při obou proudech, ovšem co se týče teplotních testů, naprosto propadnul článek GP Lithium, který při  $-20^{\circ}\text{C}$  vykázal nulovou kapacitu a velmi vysoký vnitřní odpor. Naopak článek Energizer Lithium dokázal obstojně fungovat i při těchto extrémních podmínkách a dokázal poskytnout naprosto nejvyšší kapacitu ze všech článků v testu. Spolu s velmi vysokou kapacitou a nízkou hmotností není divu, že byl použit i na palubě raketoplánu [19]. Podobně velmi dobrou funkčnost prokázal nabíjecí NiMH článek Sanyo Eneloop, který měl nejnižší vnitřní odpor ze všech článků ve všech teplotních testech a také poskytoval vysokou kapacitu při vysoké proudové zátěži. Ačkoliv je jeho kapacita nižší než u lithiového, pro každodenní použití je výrazně vhodnější – i bez velkých výpočtů zjistíme, že po pouhých dvou nabitích je již jeho použití ekonomičtější.

## 6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat tester kapacity baterií a akumulátorů, který bude také umožňovat měření jejich vnitřního odporu. Návrh musel být řešen tak, aby zařízení pracovalo autonomně a tudíž mohlo pracovat i při vypnutém PC jen využívající napájení z USB. Na základě tohoto požadavku bylo potřeba mít v zařízení paměť, do které se budou naměřené veličiny ukládat a poté půjdou dávkově přenést do PC. Jelikož jsem chtěl, aby bylo možné měření provádět i naprosto bez přítomnosti napájení z počítače (předchozí návrh počítal s přímým využitím 5 V z USB pro napájení zařízení), vybavil jsem jej interním Li-ion akumulátorem. Toto řešení umožňuje po spuštění měření naprosté odpojení USB, tudíž se nemůže například stát, že při vypnutí/zapnutí PC dojde k selhání měření z důvodu krátkodobého odpojení napájení USB. Toto chování vykazuje například můj Thinkpad x220i Tablet, který ačkoliv ve vypnutém stavu (při připojeném napájení) poskytuje napájení USB, při zapnutí dojde ke krátkodobému výpadku. Stejné chování vykazuje i při přechodu z/do režimu spánku, kdy jsou USB porty napájeny dokonce i při běhu na baterii. Tyto krátkodobé výpadky by způsobily přerušení měření, což by bylo velmi nežádoucí vzhledem k tomu, že kapacitní testy mohou trvat i přes 24 hodin.

Celkem se práce dělí do čtyř částí. V první části jsem se zabýval historií a teoretickým rozбором v současnosti nejpožívanějších primárních a sekundárních článků, jejich výhodami a nevýhodami.

Náplní druhé části práce byl teoretický návrh a popis jednotlivých částí zařízení – od použitého mikrokontroléru, přes popis výběru proudu až po metodiku měření kapacity a vnitřního odporu. Je zde také zmíněna například problematika životnosti EEPROM či nutnost ochranného obvodu zařízení a jinými problémy, které se vyskytly během konstrukce. Dále obsahuje také návrh software měřicího zařízení i ovládacího software na PC, který slouží k nastavení proudu, vykreslení grafu průběhu napětí v čase a podobně.

Předposlední část se zaměřuje na mechanickou konstrukci, výrobu a osazení DPS a základní testy sestaveného přístroje. Byl zde také zmíněn výběr konstrukčního boxu pro umístění osazené desky.

V poslední části práce jsem se zaměřil na testování dostupných „tužkových“ článků, jejich srovnání při různých podmínkách a posouzení ekonomické výhodnosti jednotlivých modelů.

# LITERATURA

- [1] ARENDÁŠ, Miroslav a Milan RUČKA. Nabíječky a nabíjení. 2., aktualizované vyd. Praha: Ingara, 1997, 101 s. ISBN 80-86056-29-5.
- [2] ATMEL. *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P datasheet*. 2012, 660 s. Dostupné z: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A/-168PA-328-328P\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A/-168PA-328-328P_datasheet.pdf)
- [3] BELLIS, Mary. Biography of Alessandro Volta. ABOUT.COM. *About.com - Inventors [online]*. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: [http://inventors.about.com/od/utstartinventors/a/Alessandro\\_Volta.htm](http://inventors.about.com/od/utstartinventors/a/Alessandro_Volta.htm)
- [4] CENEK, Miroslav et al. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. ISBN 80-86534-03-0.
- [5] DURACELL. Lithium Technical Bulletin. 14 s. Dostupné z: [http://ww2.duracell.com/media/en-US/pdf/gtcl/Technical\\_Bulletins/LithiumTechnicalBulletin.pdf](http://ww2.duracell.com/media/en-US/pdf/gtcl/Technical_Bulletins/LithiumTechnicalBulletin.pdf)
- [6] ENERGIZER. *Eveready Carbon Zinc Application manual*. 2001, 13 s. Dostupné z: [http://data.energizer.com/PDFs/carbonzinc\\_appman.pdf](http://data.energizer.com/PDFs/carbonzinc_appman.pdf)
- [7] ENERGIZER. *Alkaline Manganese Dioxide Handbook and Application Manual*. 2012. Dostupné z: [http://data.energizer.com/PDFs/alkaline\\_appman.pdf](http://data.energizer.com/PDFs/alkaline_appman.pdf)
- [8] ENERGIZER. *Energizer Silver Oxide Application manual*. 2001, 5 s. Dostupné z: [http://data.energizer.com/PDFs/silveroxide\\_appman.pdf](http://data.energizer.com/PDFs/silveroxide_appman.pdf)
- [9] ENERGIZER. *Lithium Iron Disulfide Handbook and Application Manual*. 2013, 18 s. Dostupné z: [http://data.energizer.com/PDFs/lithiuml91l92\\_appman.pdf](http://data.energizer.com/PDFs/lithiuml91l92_appman.pdf)
- [10] ENERGIZER *Technical Bulletin: Battery Internal Resistance*. 2005. Dostupné z: <http://data.energizer.com/PDFs/BatteryIR.pdf>
- [11] ERIKSSON, Tom. LiMn2O4 as a Li-Ion battery cathode from bulk to electrolyte interface. Uppsala: Univ, 2001. ISBN 91-554-5100-4. Dostupné z: <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:160906/FULLTEXT01.pdf>. Dissertation. Uppsala University.
- [12] FORTUNE SEMICONDUCTOR CORP. *DW01-P: One Cell Lithium-ion/Polymer Battery Protection IC*. 2006. Dostupné z: [http://www.ic-fortune.com/upload/Download/DW01-P\\_DataSheet\\_V10.pdf](http://www.ic-fortune.com/upload/Download/DW01-P_DataSheet_V10.pdf)

- [13] FTDI CHIP. *Future Technology Devices International: FT232R USB UART IC*. 2010. Dostupné z: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)
- [14] GARCHE, Juergen. *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Boston, MA: Elsevier, 2009, p. cm. ISBN 978-044-4520-937.
- [15] LESURF, Jim. *The E12 Series*. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: [http://www.st-andrews.ac.uk/~www\\_pa/Scots\\_Guide/info/comp/passive/resistor/e12/e12.html](http://www.st-andrews.ac.uk/~www_pa/Scots_Guide/info/comp/passive/resistor/e12/e12.html)
- [16] MICROCHIP. *24AA512/24LC512/24FC512: 512K I2C Serial EEPROM*. 2010. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21754M.pdf>
- [17] NANJING TOP POWER ASIC CORP. *TP4056: 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation*. 2014. Dostupné z: <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>
- [18] NASA. *Apollo experience report: Battery subsystem*. Houston, USA, 1972. Dostupné z: [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19720024228\\_1972024228.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19720024228_1972024228.pdf)
- [19] NASA. *Use of Lithium IronDisulfideCell for the Orbiter Wing Leading Edge Impact Sensor*. 2005. Dostupné z: [https://batteryworkshop.msfc.nasa.gov/presentations/TueAM\\_01\\_Use\\_of\\_Lithium\\_IronDisulfide\\_Cell\\_Orbiter\\_Wing\\_Leading\\_Edge\\_JJeevarajan.pdf](https://batteryworkshop.msfc.nasa.gov/presentations/TueAM_01_Use_of_Lithium_IronDisulfide_Cell_Orbiter_Wing_Leading_Edge_JJeevarajan.pdf)
- [20] PANASONIC Self-Discharge. *Eneloop technology* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.eneloop.info/home/technology/self-discharge.html>
- [21] PLANTÉ, Gaston. *The Storage Of Electrical Energy*. Francie: Paul Bedford, 1859. Dostupné z: <https://archive.org/details/storageofelectri031249mbp>
- [22] PROLIFIC. *PL-2303HX Edition USB to Serial Bridge Controller: Product datasheet*. 2013. Dostupné z: [http://www.prolific.com.tw/UserFiles/files/ds\\_pl2303HXD\\_v1\\_4\\_4.pdf](http://www.prolific.com.tw/UserFiles/files/ds_pl2303HXD_v1_4_4.pdf)
- [23] Arduino: jak pro něj začít programovat. In: *Root.cz* [online]. 2010 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/arduino-jak-pro-nej-zacit-programovat>

- [24] SILICON LABS. *CP2102/9: Single-Chip USB to UART bridge*. 2013. Dostupné z: <http://www.silabs.com/SupportDocuments/TechnicalDocs/CP2102-9.pdf>
- [25] ST MICROELECTRONICS. *BD243C, 244C: Complementary power transistors*. 2007. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00001155.pdf>
- [26] TEXAS INSTRUMENTS. *MAX232, MAX232I: Dual EIA-232 drivers/receivers*. 1989, 19 s. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>
- [27] TEXAS INSTRUMENTS. *LM158/LM258/LM358/LM2904: Low Power Dual Operational Amplifiers*. 2000. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358-n.pdf>
- [28] THREW, Jesse. *What Is an NiCd Rechargeable Battery*. eHow [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: [http://www.ehow.com/facts\\_7611299\\_nicd-rechargeable-battery.html](http://www.ehow.com/facts_7611299_nicd-rechargeable-battery.html)
- [29] USB IMPLEMENTERS FORUM. *Universal Serial Bus: Power Delivery Specification*. 2013. Dostupné z: [http://www.usb.org/developers/docs/usb20\\_docs/usb\\_20\\_070113.zip](http://www.usb.org/developers/docs/usb20_docs/usb_20_070113.zip)

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|                  |                                                               |
|------------------|---------------------------------------------------------------|
| USB              | Universal Serial Bus                                          |
| PC               | Personal Computer                                             |
| AA               | Velikost „tužkové baterie“                                    |
| DIP              | Dual In-line Package                                          |
| PC               | Personal Computer                                             |
| RISC             | Reduced Instruction Set Computing                             |
| kB               | kiloByte                                                      |
| EEPROM           | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory           |
| SRAM             | Static Random Access Memory                                   |
| FRAM             | Ferroelectric Random Access Memory                            |
| AD               | Analog-to-Digital                                             |
| LCD              | Liquid Crystal Display                                        |
| UPS              | Uninterruptible Power Supply                                  |
| AGM              | Absorbed Glass Mat                                            |
| NiMH             | Nickel–Metal Hydride battery                                  |
| NiCd             | Nickel–Cadmium battery                                        |
| Li-ion           | Lithium-ion battery                                           |
| IEC              | International Electrotechnical Commission                     |
| USART            | Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter |
| QFN              | Quad-flat no-leads                                            |
| DPS              | Deska plošných spojů                                          |
| LED              | Light-Emitting Diode                                          |
| SMD              | surface-mount device                                          |
| I <sup>2</sup> C | Inter-Integrated Circuit                                      |
| Zn-C             | Zinko-uhlíkový článěk                                         |
| ASCII            | American Standard Code for Information Interchange            |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |                                                                                                                  |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4  | Konstrukce článku CR2032 . . . . .                                                                               | 12 |
| 2.5  | Lithiové články velikosti AA . . . . .                                                                           | 13 |
| 2.6  | Konstrukce Ni-MH článku . . . . .                                                                                | 15 |
| 2.7  | Li-ion článek Panasonic NCR18650 . . . . .                                                                       | 16 |
| 3.3  | Typický Průběh nabíjení metodou konstantní proud, konstantní<br>napětí obvodem TP4056, převzato z [17] . . . . . | 21 |
| 3.5  | Zapojení obvodu MCP16251 . . . . .                                                                               | 22 |
| 3.6  | Zapojení ochranného obvodu . . . . .                                                                             | 23 |
| 3.15 | Vývojový diagram programu . . . . .                                                                              | 31 |
| 3.17 | Vývojový diagram funkce měření . . . . .                                                                         | 33 |
| 3.18 | Vývojový diagram funkce odeslání naměřených hodnot do PC . . . . .                                               | 34 |
| 3.19 | Vývojový diagram funkce měření vnitřního odporu článků . . . . .                                                 | 34 |
| 3.20 | Ukázka funkce měření vnitřního odporu . . . . .                                                                  | 35 |
| 3.21 | Obslužný program na PC s výsledkem měření článku AA . . . . .                                                    | 36 |
| 3.22 | Obslužný program na PC s výsledkem měření článku Li-ion . . . . .                                                | 36 |
| 4.1  | Finální podoba DPS . . . . .                                                                                     | 37 |
| 4.2  | Fotka desky zařízení, vrchní a spodní pohled . . . . .                                                           | 38 |
| 4.3  | Zakoupená konstrukční krabička . . . . .                                                                         | 39 |
| 4.5  | Závislost proudu na vstupním napětí . . . . .                                                                    | 40 |
| 5.1  | Články v testu . . . . .                                                                                         | 41 |
| 5.5  | Průběh napětí vybraných článků při různých proudech . . . . .                                                    | 43 |
| 5.6  | Průběh napětí článků při vybíjecím proudu 500 mA . . . . .                                                       | 44 |
| 5.7  | Průběh napětí článků při vybíjecím proudu 100 mA . . . . .                                                       | 44 |
| 5.9  | Průběh napětí článků při různých teplotách . . . . .                                                             | 45 |

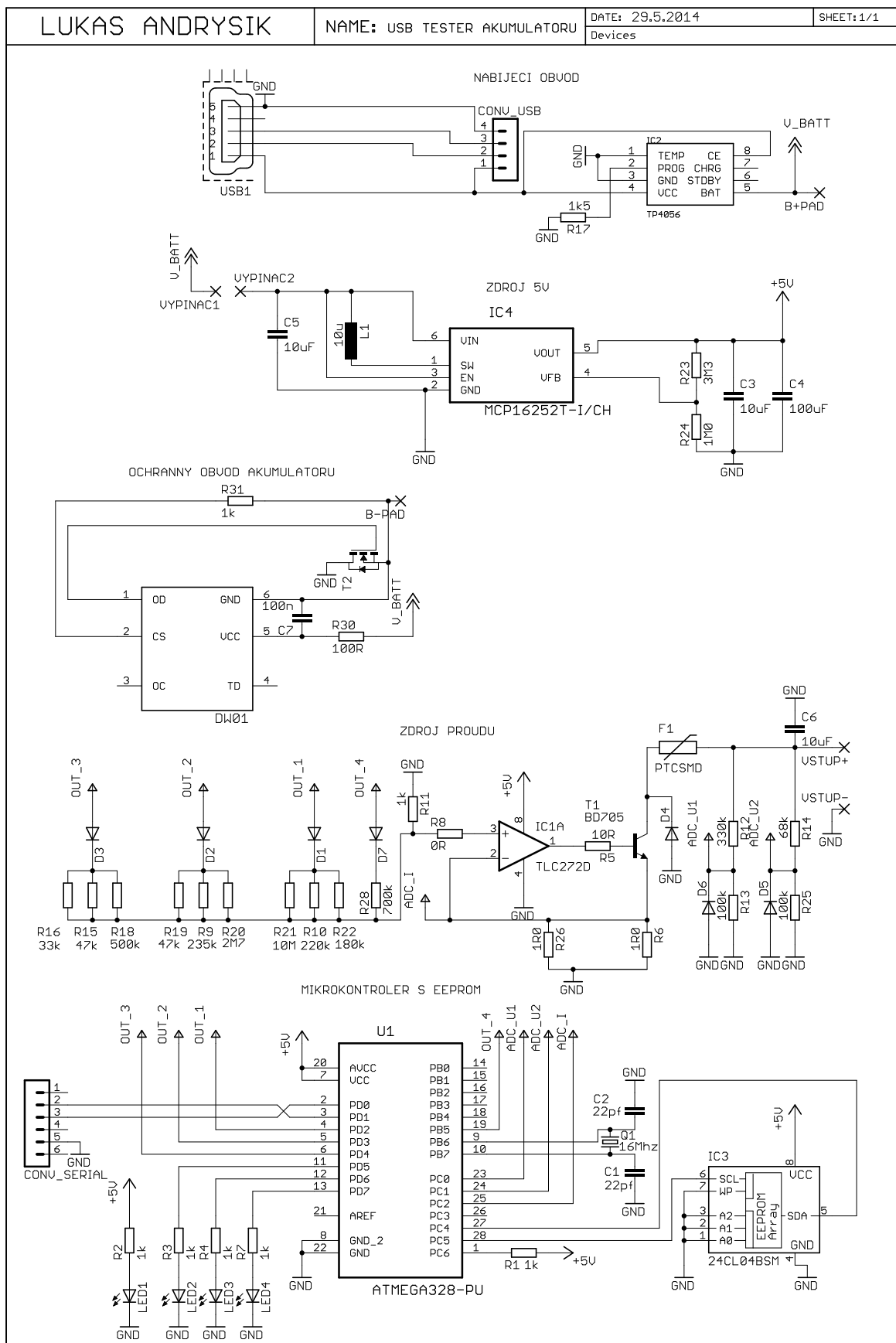
# SEZNAM PŘÍLOH

|          |                                |           |
|----------|--------------------------------|-----------|
| <b>A</b> | <b>Celkový vzhled zařízení</b> | <b>54</b> |
| <b>B</b> | <b>Schéma zapojení</b>         | <b>55</b> |
| <b>C</b> | <b>Předloha pro výrobu DPS</b> | <b>56</b> |
| <b>D</b> | <b>Osazovací plány</b>         | <b>57</b> |
| D.1      | Horní vrstva . . . . .         | 57        |
| D.2      | Spodní vrstva . . . . .        | 57        |

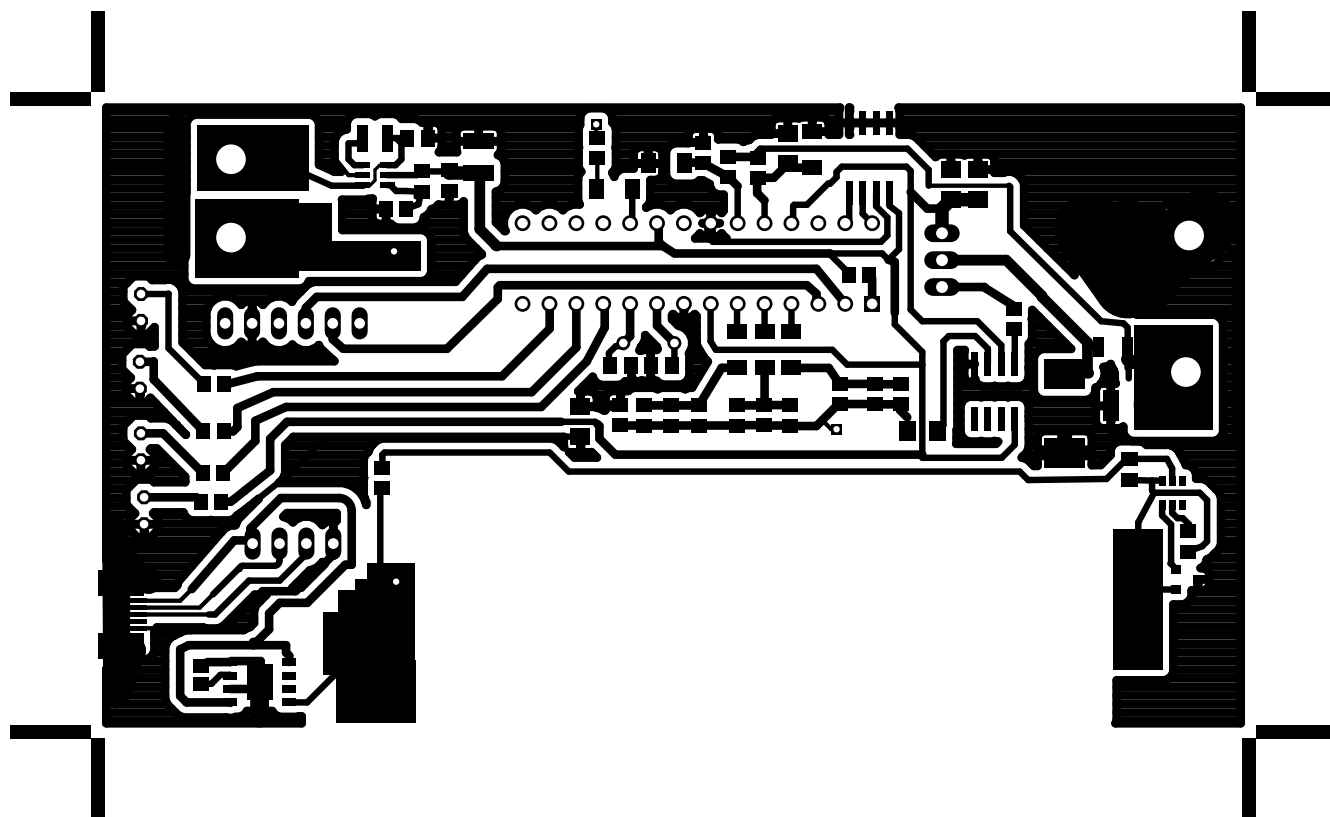
## A CELKOVÝ VZHLED ZAŘÍZENÍ



# B SCHÉMA ZAPOJENÍ

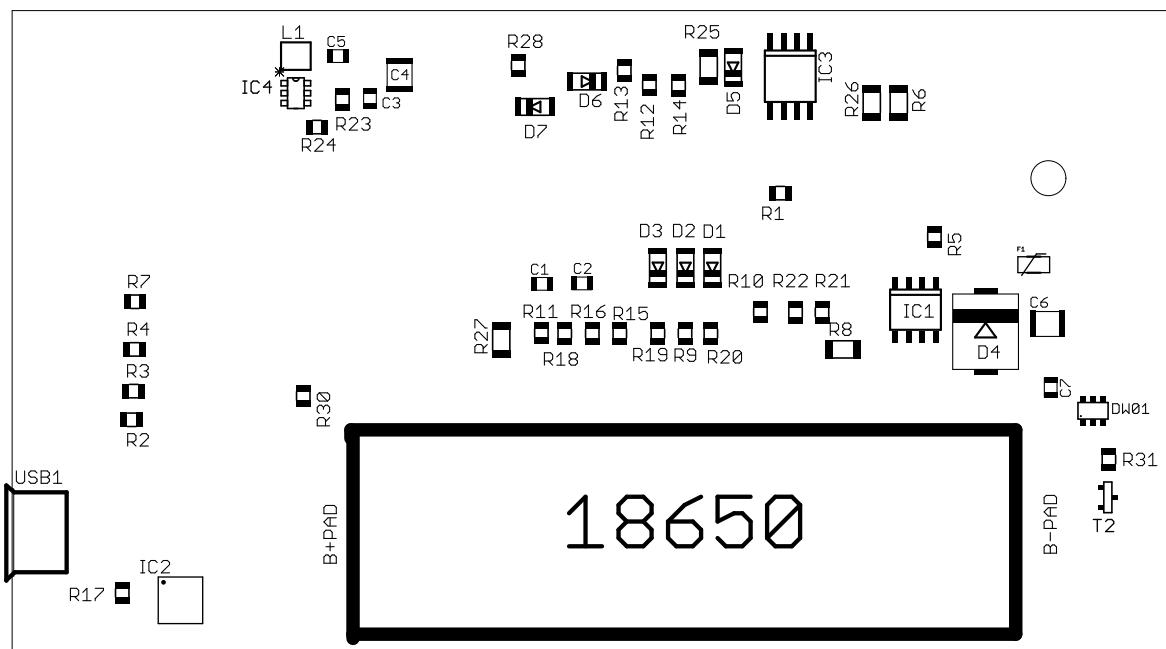


## C PŘEDLOHA PRO VÝROBU DPS



## D OSAZOVACÍ PLÁNY

### D.1 Horní vrstva



### D.2 Spodní vrstva

