



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## NÁVRH TESTERU AKUMULÁTORU PRO RUČNÍ NÁŘADÍ

DESIGN OF TESTER FOR ELECTRIC HAND TOOLS BATTERIES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Václavík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

BRNO 2023

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Bc. Tomáš Václavík</b>
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Návrh testeru akumulátoru pro ruční nářadí

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

U ručního akumulátorového nářadí používaného v průmyslu je vhodné určovat zbytkovou životnost akumulátoru a tím předejít zbytečnému plýtvání na straně jedné, případně snížení výkonu ve výrobním procesu na straně druhé. Ačkoliv je možné získat zbytkovou životnost analýzou na specializovaných přístrojích, jejich použití v průmyslu je nepraktické. Podstatou zadání diplomové práce je navrhnout a realizovat tester akumulátorů snadno použitelný i nekvalifikovanou osobou.

#### Cíle diplomové práce:

- Seznamte se s charakteristikou Li-XX akumulátorů a jejich nabíjením a vybíjením
- Navrhněte zařízení, které bude schopné odhadnout zbytkovou životnost akumulátoru
- Zařízení implementujte a verifikujte

#### Seznam doporučené literatury:

Q. Ouyang, J. Chen: Advanced Model-Based Charging Control for Lithium-Ion Batteries, Springer, 1st ed., 2022

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce popisuje návrh a realizaci jednoduchého zařízení pro odhad stavu života modulu Li-ion akumulátorů. Jsou prozkoumány základní parametry Li-ion akumulátorů, známé metody pro zkoumání jejich stavu. Jsou analyzovány vlastnosti konkrétního typu akumulátoru a příslušného nabíječe. Je proveden kompletní návrh a realizace zařízení, provedeno měření, záznam dat a jejich analýza. Je vytvořen algoritmus pro rychlý odhad stavu života akumulátoru.

## **Summary**

This thesis describes design and realization of simple testing device used to estimate State of Health of Li-ion accumulator pack. Basic parameters of Li-ion accumulators and methods used to examine their state are explored. Specific type of accumulator and its charger are analyzed. Complete device design, device realization, measurement records and their analysis are carried out. Algorithm for quick estimate of State of Health is created.

## **Klíčová slova**

li-ion akumulátor, testovací zařízení, odhad stavu života

## **Key words**

li-ion accumulator, testing device, state of health estimation

VÁCLAVÍK, Tomáš. Návrh testeru akumulátoru pro ruční nářadí. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149700>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jiří Krejsa.

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně s využitím zdrojů uvedených v seznamu zdrojů.

Tomáš Václavík

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Krejsovi, Ph.D. za cenné rady při vedení práce a Janu Oslizlému a personálu firmy REHAU za vstřícnost při poskytnutí testovaných akumulátorů a nabíječek, na kterých byla práce založena.

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Technický průzkum.....	10
2.1	Lithium-iontový akumulátor.....	10
1.2.1	Akumulátorové moduly Mirka.....	11
1.2.2	Základní nomenklatura a procesy měřených parametrů.....	13
2.2	Procesy vybíjení a nabíjení akumulátoru.....	15
2.2.1	Vliv vnitřního odporu.....	15
2.2.2	Průběh napětí OCV a napětí při zátěži v závislosti na SoC.....	18
2.2.3	Rychlost vybíjení akumulátoru.....	20
2.2.4	Stav života akumulátoru SoH.....	20
2.2.5	Nabíjení akumulátoru.....	22
2.3	Metody určení parametrů a života akumulátoru.....	23
3.2.1	Vybíjecí zkouška.....	23
3.2.2	Měření impedance.....	24
3	Návrh řešení.....	26
3.1	Postup řešení.....	27
3.2	Návrh prostorového uspořádání uvnitř modulu zařízení.....	30
3.3	Zásuvka baterie.....	31
3.4	Elektromagnetická relé.....	31
3.5	Řídící jednotka.....	32
5.3.1	Mikrokontroler.....	32
5.3.2	Externí A/D převodník.....	32
5.3.3	Zdroj referenčního napětí pro ADC.....	33
5.3.4	Vstupní zesilovače.....	33

5.3.5	Obvody pro připojení termistoru baterie .....	34
5.3.6	Budiče relé.....	35
5.3.7	Komunikační převodník pro připojení do LAN .....	35
5.3.8	Obvody napájení.....	35
3.6	Snímač proudu .....	36
3.7	Zátěžový rezistor.....	36
3.8	Software .....	37
8.3.1	Programové vybavení mikrokontroleru.....	37
8.3.2	Komunikace.....	39
8.3.3	Počítačová aplikace pro záznam.....	40
4	Postup měření a analýza zaznamenaných dat .....	42
4.1	Měření a zpracování dat.....	42
4.2	Regrese a klasifikace .....	48
4.3	Aplikace pro rychlou detekci SoH nabitých akumulátorů.....	50
4.4	Ověření funkčnosti testeru .....	52
5	Závěr .....	54
6	Seznam zdrojů.....	55
7	Přílohy .....	58



# 1 Úvod

Lithium-iontové akumulátory jsou využívány jako přenosné zdroje elektrické energie především díky své vysoké gravimetrické i volumetrické hustotě energie, vysoké výkonové hustotě a možnosti jejich opakovaného nabíjení. Tyto obecné vlastnosti lithium-iontových (Li-ion) akumulátorů jsou uplatněny pro přenosná elektrická zařízení, která vyžadují nízkou celkovou hmotnost a zároveň mají vysoké energetické nároky.

V rámci skupiny firem REHAU se používá elektrické ruční nářadí pro úpravu povrchů vyráběné firmou Mirka, která se specializuje na výrobu vybavení pro broušení a leštění. Při práci s ručním nářadím, které využívá Li-ion akumulátory není zaměstnanec limitován délkou kabelu a kabel nepřekáží při práci na obtížně dostupných místech, využití akumulátorového nářadí je zaměstnanci preferováno. Nástroje jsou používány ve směnném provozu, což znamená, že akumulátorové moduly jsou pravidelně nabíjeny a vybíjeny.

Opakované cykly vybití a nabíjení akumulátoru vedou k rychlému vyčerpání výrobcem udávaného celkového počtu cyklů, které mohou být hrubým ukazatelem života akumulátoru a skutečné kapacity. Cykly akumulátoru nejsou u ručních zařízení v praxi běžně zaznamenávány, protože za běžných podmínek málokdy dochází k hlubokému vybití akumulátoru a je obtížné odhadnout aktuální cyklus akumulátoru.

Od zaměstnanců firmy REHAU vyšla poptávka po návrhu a realizaci jednoúčelového testovacího zařízení a nalezení identifikátorů stárnutí, které umožní odlišení akumulátorových modulů se sníženou kapacitou od modulů s vyhovující kapacitou uživatelem, což by mělo předejít předčasnému vypnutí ručního nářadí a možné škodě při výrobě.

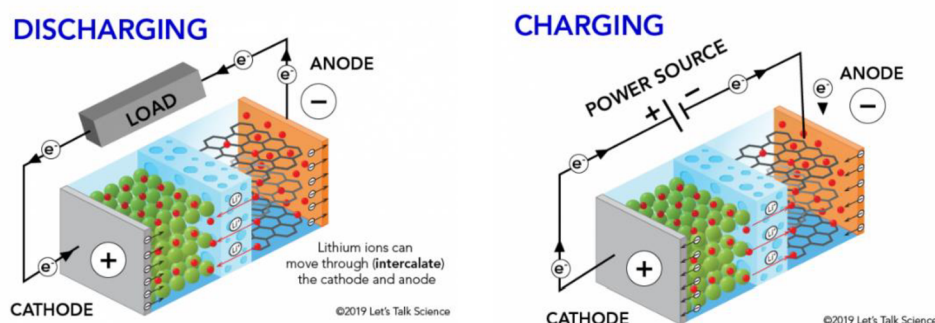
Tato práce je primárně zaměřena na vytvoření jednoduchého zařízení pro identifikaci stavu života Li-ion modulu pro ruční nástroje, které bude využito uživatelem k detekci a vyřazení nevyhovujících kusů před použitím ve výrobě, kde snížená kapacita negativně ovlivňuje kvalitu vykonané práce.

## 2 Technický průzkum

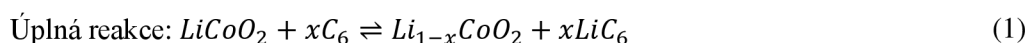
Než přikročíme k průzkumu zavedených metod určování stavu života a vlastního návrhu, uvedeme krátký obecný popis akumulátoru, parametry analyzovaných akumulátorů a jejich příslušenství. Dále probereme základní terminologii akumulátoru, která je zavedena pro jednotnost popisu výsledků a podmínek při měření.

### 2.1 Lithium-iontový akumulátor

Li-ion akumulátor nebo sekundární článek je elektrochemický zdroj proudu, který lze opakovaně nabíjet. Článek obsahuje dvě elektrody, anodu a katodu. Aby nedošlo k přímému přenosu elektronů mezi katodou a anodou, jsou elektrody odděleny elektrolytem, kde jsou nosičem elektrického náboje volné ionty. Elektrolyt je zapuštěn do separátoru, který zabraňuje kontaktu elektrod, ale umožňuje volný průchod iontů. Při propojení katody a anody externím elektrickým obvodem dochází k samovolné reakci. Elektrochemické děje vybíjení a nabíjení Li-ion článku jsou názorně zobrazeny na Obr. 1. a Obr. 2. Chemická rovnice (1) popisující tento děj pro LCO typ lithium-iontového akumulátoru je přiložena pod ilustrací [1].



Obr. 1. a 2.: vybíjení vlevo a nabíjení Li-ion akumulátoru vpravo [1]



### 1.2.1 Akumulátorové moduly Mirka

Finská společnost Mirka je výrobcem ručního nářadí, ke kterému dodává vlastní akumulátorové moduly kompatibilní s řadou jejich nástrojů. Tyto moduly viz Obr. 3. jsou ergonomicky přizpůsobeny pro jednoduché zasunutí do ručního nářadí a nabíjecí stanice pro snadnou manipulaci.



Obr. 3.: akumulátorový modul Mirka [2]



Obr. 4.: pohled na kontakty modulu

Námi analyzované akumulátorové moduly jsou:

Označení modulu	Napětí [V]	Kapacita [Ah]	Kapacita [Wh]
Mirka Battery Pack BPA 10820	10.8	2.0	21.6
Mirka Intelligent Battery BPA 10825	10.8	2.5	27.0

Moduly obsahují 3 sériově zapojené články, Obr. 5. a 6., dle označení modulu:

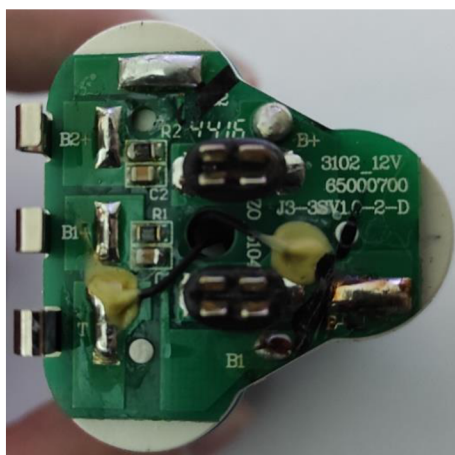
Označení článku	Napětí [V]	Kapacita [Ah]	Kapacita [Wh]
SAMSUNG INR18650-R20	3.6	2.0	7.2
SAMSUNG INR18650-R25	3.6	2.5	9.0



Obr.5.: články INR18650-R20 obsažené v BPA 10820



Obr.6.: články INR18650-R25 obsažené v BPA 10825



Obr. 7.: deska modulu BPA 10820



Obr. 8.: deska modulu BPA 10825

Moduly jsou vybaveny 5 kontakty, viz plastový kryt Obr. 4., dva hlavní kontakty značené (+) a (-), dále dva pomocné kontakty (C1) a (C2), a kontakt termistoru (T). Kontakty jsou pevnou součástí desky plošných spojů, Obr. 7., která není přístupná bez rozebrání plastového obalu modulu. Novější modul 10825, Obr. 8., obsahuje elektroniku zodpovědnou za správu baterie a Bluetooth komunikaci pro propojení s mobilní aplikací určenou pro monitorování stavu baterie.

Z označení článku lze vyčíst model, výrobce a výrobní číslo, výpis parametrů článků je součástí katalogových listů [3] a [4].

Nabíjecí stanice Mirka BCA 108 je výhradně určena k nabíjení 10,8 V akumulátorových modulů Mirka. Zařízení vyhovuje třídě izolace II. V příručkách pro daná zařízení je popsána obsluha nabíječky, ale nebyl nalezen bližší popis procesu, kterým jsou moduly nabíjeny, oficiální stránky výrobce neposkytují bližší interní popis výrobku.

### 1.2.2 Základní nomenklatura a procesy měřených parametrů

Sjednocení terminologie je obecně vhodné pro jednotnost záznamu a jasnou pochopitelnost výsledků. V dalších částech práce budou použity zkratky, které jsou zavedeny v následujícím výčtu. Definice termínů jsou čerpány z katalogového listu SAMSUNG akumulátorů [3] a [4], odpovídající standardu IEC61960 a testům UN 38.3, mimo jiné vyžadovaných pro bezpečnou přepravu, skladování a aplikaci Li-ion akumulátorů. Překlad některých výrazů je proveden s pomocí Terminologické databáze (TDB) [5].

Výčet specifických parametrů Li-ion článku:

**Kapacita** akumulátoru v [Ah] vyjadřuje teoretickou schopnost akumulátoru dodávat danou hodnotu proudu po dobu jedné hodiny.

**Rychlost vybíjení C** (C-rate) vyjadřuje velikost vybíjecího proudu v poměru k udávané kapacitě. Při rychlosti vybíjení 1 C se vybije akumulátor za hodinu.

**Standardní testovací podmínky** určují okolní teplotu  $25 \pm 5$  °C, vlhkost  $65 \pm 20$  % a vlastnosti měřicích zařízení, které jsou alespoň na doporučené úrovni přesnosti 0,5 mA pro proud a 1 mV pro napětí. Standardní frekvence měření impedance (RLC) pomocí střídavého proudu je 1 kHz.

Dále jsou výrobcem specifikovány pracovní podmínky akumulátoru, definují se minimální a maximální meze pracovní teploty a napětí, při kterých je bezpečné akumulátor provozovat a zaručit správnou funkci

**Jmenovitá kapacita** (Nominal Discharge Capacity) akumulátoru v [Ah] vyjadřuje schopnost akumulátoru dodávat konstantní hodnotu vybíjecího proudu v C ze stavu plného nabití po stav plného vybití za standardních podmínek. Vynásobením času s hodnotou vybíjecího proudu dostáváme jmenovitou kapacitu, která by u nových článků měla dosahovat alespoň hodnoty udávané výrobcem.

**Napětí naprázdno** OCV (Open Circuit Voltage) je napětí na svorkách bez připojené zátěže v ustáleném stavu akumulátoru.

**Jmenovité napětí** (Nominal Voltage) je referenční napětí, které je udáváno výrobcem a dosahuje hodnot blíží se průměrnému napětí v průběhu plného cyklu vybíjení plně nabitého akumulátoru za standardních podmínek.

**Konečné napětí** (Cut-off Voltage) je napětí článku, při kterém by mělo dojít k automatickému odpojení buď zátěže nebo nabíječky a zamezení dalšího vybíjení nebo nabíjení. Konečné napětí obvykle v katalogovém listu odpovídá plně vybitému nebo plně nabitému akumulátoru.

**Stav života** SoH (State of Health) je poměr skutečné kapacity a jmenovité kapacity akumulátoru.

**Stav nabití** SoC (State of Charge) je poměr dostupné a skutečné kapacity akumulátoru.

**Hloubka vybití** DoD (Depth of Discharge) udává SoC nebo jemu napětí odpovídající, po které je akumulátor vybíjen.

**Konec života** akumulátoru EoL (End of Life) je relativní dle aplikace a definuje pokles celkové kapacity SoH pod úroveň, kdy akumulátor nesplňuje požadavky kladené aplikací.

**Cyklus** je proces, kdy akumulátor projde plným vybitím a nabitím, jako plné vybití označujeme děj, kdy akumulátor přejde ze stavu SoC 100 % do 0 %, při nabíjení je následně nabit zpět na 100 %.

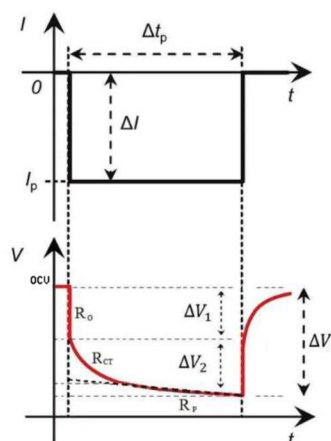
## 2.2 Procesy vybíjení a nabíjení akumulátoru

Proces vybíjení akumulátoru je obtížné jednoduše popsat, protože je ovlivněn množstvím faktorů. Hlavní faktory ovlivňující vybíjecí a nabíjecí charakteristiku akumulátoru jsou: teplota okolí a akumulátoru, rychlost vybíjení, SoH, SoC, OCV a vnitřní odpor [6]. V práci budou zkoumány klasické pracovní podmínky, nebudeme se zabývat extrémními stavy [7], které nastávají při překročení doporučeného konečného napětí nebo teploty při vybíjení a nabíjení.

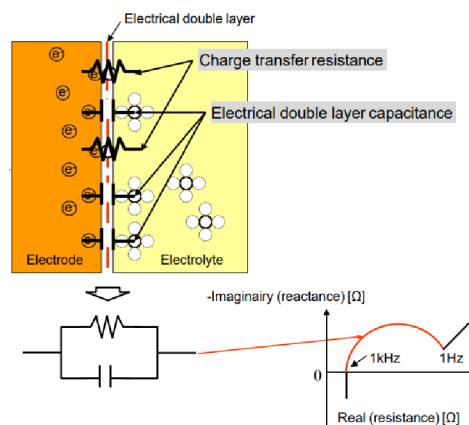
### 2.2.1 Vliv vnitřního odporu

Vnitřní odpor reálného zdroje proudu může být ukazatelem, jak dobře dokáže zdroj dodávat proud. Nižší vnitřní odpor obvykle znamená, že zdroj proudu může dodávat více proudu do vnějšího obvodu a dochází k menší tepelné ztrátě uvnitř zdroje a menšímu úbytku napětí na výstupu. Obdobně se uplatňuje ztráta na odporu při nabíjení. Vnitřní odpor akumulátoru je složen z dílčích odporů, které lze dobře popsat na vybíjecím průběhu. Vnitřní odpor akumulátoru je jeden z parametrů testovaných při výrobě [8] a jeho hodnota je ovlivněna velikostí, materiály a zapojením článku [6].

Nejjednodušší ekvivalentní model zapojení, kterým lze reálný zdroj proudu popsat je systémem nultého řádu, který se skládá ze sériového ideálního zdroje napětí a odporu [9]. Problémem modelu je, že nezachycuje dynamické děje uvnitř akumulátoru a vlivy okolí [9]. Když akumulátor skokově zatížíme konstantním proudem, můžeme sledovat průběh napětí, viz Obr. 9., u kterého lze pozorovat 3 hlavní fáze [10].



Obr. 9.: průběh napětí při zatížení konstantním proudem [10].



Obr. 10.: vliv přesunu náboje mezi elektrolytem a elektrodami [8].

V první fázi po sepnutí zátěže dochází v rozsahu mikrosekund [11] k úbytku napětí  $\Delta V_1$  z nezatíženého OCV na reálné části impedance  $R_{DC}$ , hodnotu odporu získáme užitím Ohmova zákona, rovnice (2), zde se sčítají úbytky napětí na přívodech, materiálu elektrod a na elektrolytu akumulátoru [10].

$$R_{DC} = \frac{\Delta V_1}{\Delta I} \quad (2)$$

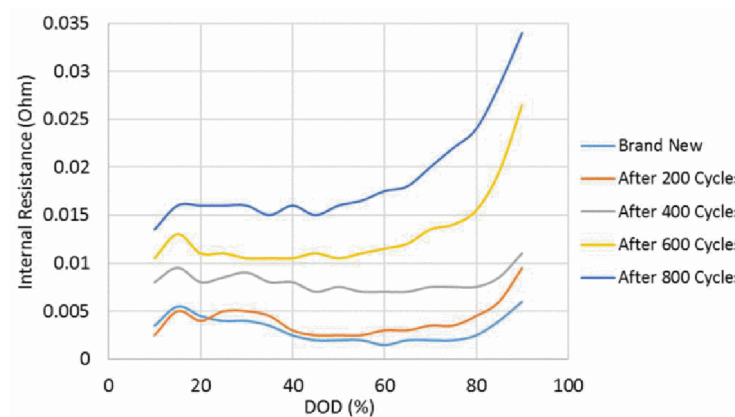
Pro druhou fázi je charakteristický delší pokles napětí, který pozorujeme několik jednotek až desítek sekund po sepnutí. V ustáleném stavu se na rozhraní mezi elektrodami a elektrolytem vyskytuje vrstva iontů, která se označuje jako elektrická dvojvrstva. Charakter dynamického procesu přenosu náboje mezi elektrolytem a elektrodami při sepnutí se modeluje paralelním RC členem [8][10], viz Obr. 10.

Ve třetí fázi se uplatňuje impedance, kterou se charakterizuje omezení přenosu náboje, který lze uvolnit při chemické reakci na elektrodě a odpor průchodu, kterému čelí ionty při pohybu pevnou elektrodou [10].

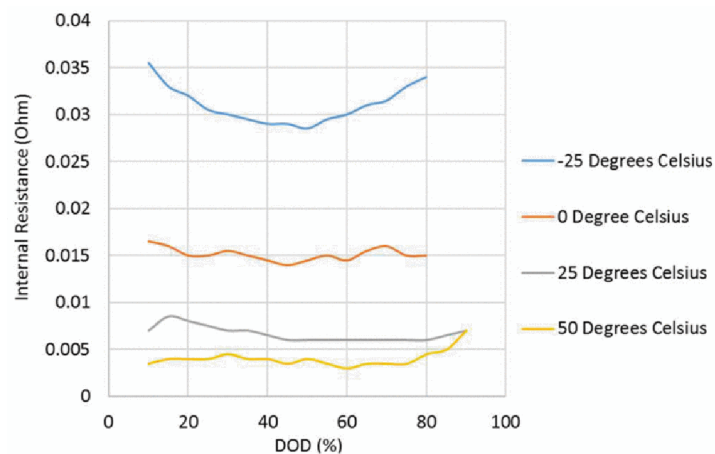
Rozšířením jednoduchého modelu, série ideálního zdroje napětí a odporu, o  $n$  paralelních RC členů získáme model, který popisuje jak vnitřní odpor, tak zvolené dynamické jevy akumulátoru [10]. Model nepostihuje vliv SoC, SoH a teploty.



Dle srovnatelných měření, která provedli RATNAKUMAR a kol. [11] a LIU a kol. [12] jsou pozorovány následující závislosti. Vnitřní odpor nelineárně klesá s rostoucí teplotou [11][12], viz Obr. 12., dále dochází ke snížení vnitřního odporu v průběhu vybíjení mezi 70 až 20 % SoC [11], a ke konci vybíjení pod 20 % SoC dochází k výraznému navýšení vnitřního odporu, viz Obr. 11. [11][12]. Závislost vnitřního odporu na SoC má sedlovitý charakter [11][7]. V průběhu stárnutí akumulátoru při cyklickém zatěžování bylo pozorováno přibližně lineární navýšení vnitřního odporu s počtem hlubokých cyklů [11], ke stárnutí a navýšení vnitřního odporu nedochází pouze vlivem cyklické zátěže, ale i při skladování [11][13].



Obr. 11.: Změna vnitřního odporu v průběhu vybití dle počtu cyklů [12]



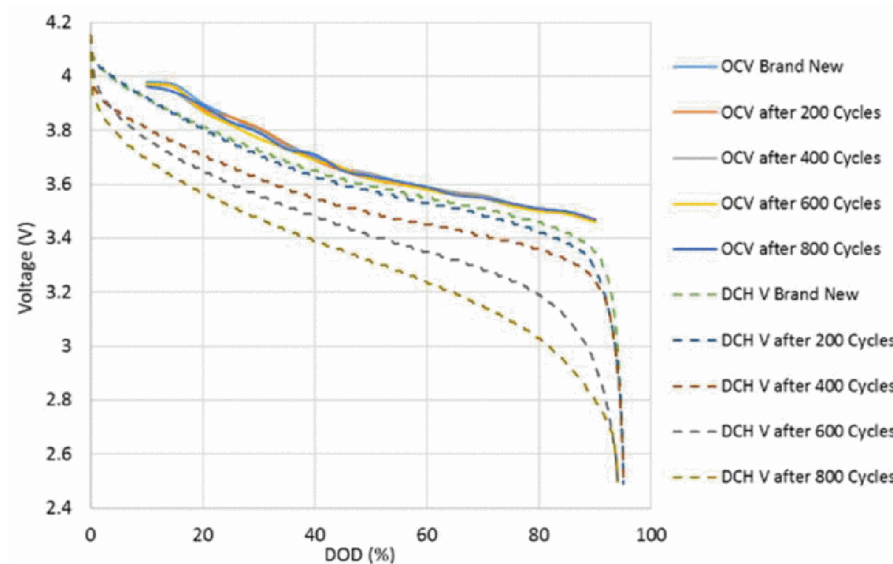
Obr. 12.: Změna vnitřního odporu v průběhu vybití za různých teplot [12]

Při měření vnitřního odporu celého modulu nebo jeho částí je potřeba brát v úvahu propojení, desky plošných spojů, ochranou elektroniku a spínací prvky, které mohou

měření vnitřního odporu znehodnotit [6], teplotní součinitele odporů obvodu mají kladnou hodnotu, elektrolyt akumulátoru se chová opačně, dochází ke snížení odporu s rostoucí pohyblivostí nosičů náboje uvnitř materiálu [12].

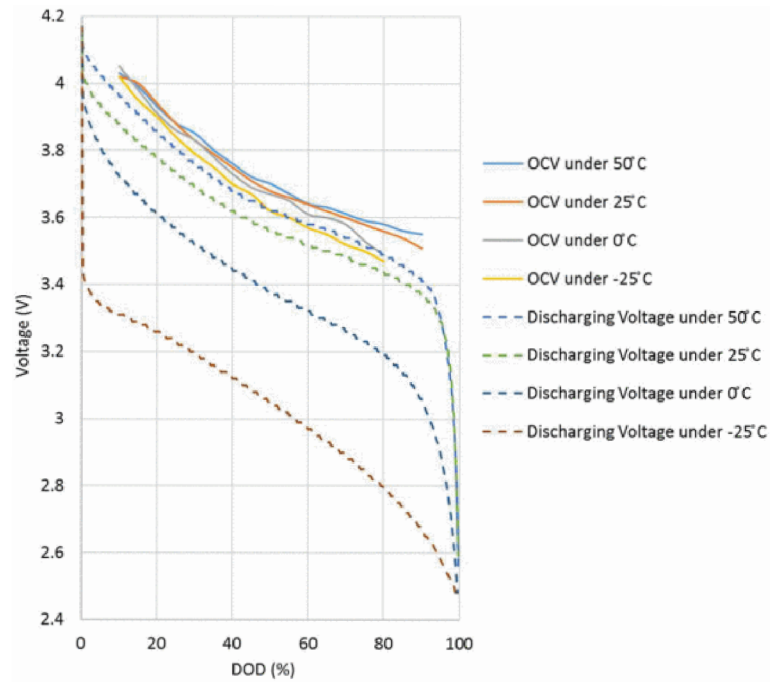
### 2.2.2 Průběh napětí OCV a napětí při zátěži v závislosti na SoC

Při odhadu SoC u částečného vybití akumulátoru je nejvýznamnějším ukazatelem OCV, hodnota OCV se pohybuje v úseku mezi konečným napětím nabíjecím a vybíjecím. Napětí OCV klesá s hloubkou vybití a stárnutí akumulátoru má minimální vliv na závislost mezi OCV a SoC [12], viz Obr. 13., ale projevuje se v úbytku napětí při zatížení konstantním proudem na výstupních svorkách (DCH V) jako důsledek zmíněného vnitřního odporu, který se v průběhu stárnutí mění.



Obr. 13.: OCV a DCH V v průběhu vybíjení za různého počtu cyklů [12]

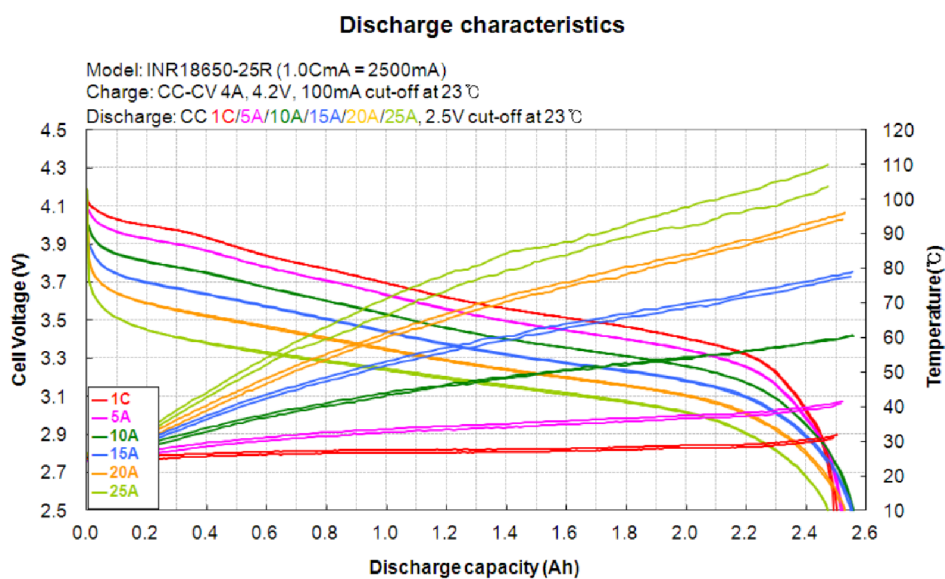
Ukazuje se, že závislost OCV na SoC souvisí s teplotou [12], viz Obr. 14., snížená teplota vede k poklesu OCV i k výraznějšímu úbytku napětí při zatížení v důsledku zvýšení odporu elektrolytu při nízké teplotě.



Obr. 14.: OCV a DCH V v průběhu vybíjení za různých teplot [12]

### 2.2.3 Rychlost vybíjení akumulátoru

Za standardních podmínek má největší vliv na čas, za který se akumulátor vybije jeho skutečná kapacita a připojená zátěž. Zátěží definujeme proud protékající obvodem. Průběh vybíjení je obvykle měřen za konstantního proudu, kterého dosáhneme použitím proměnlivé, elektronické zátěže. Hodnotu takto nastaveného proudu značíme násobkem C, z definice jmenovité kapacity a nastavené hodnoty C lze odhadovat dobu vybití. Na dobu vybití mají opět vliv dříve zmíněné parametry, jako je vnitřní odpor a teplota akumulátoru, proto je jmenovitá kapacita definována za standardních podmínek. Vliv velikosti vybíjecího proudu na akumulátor INR18650-25R je znázorněn na Obr. 15.

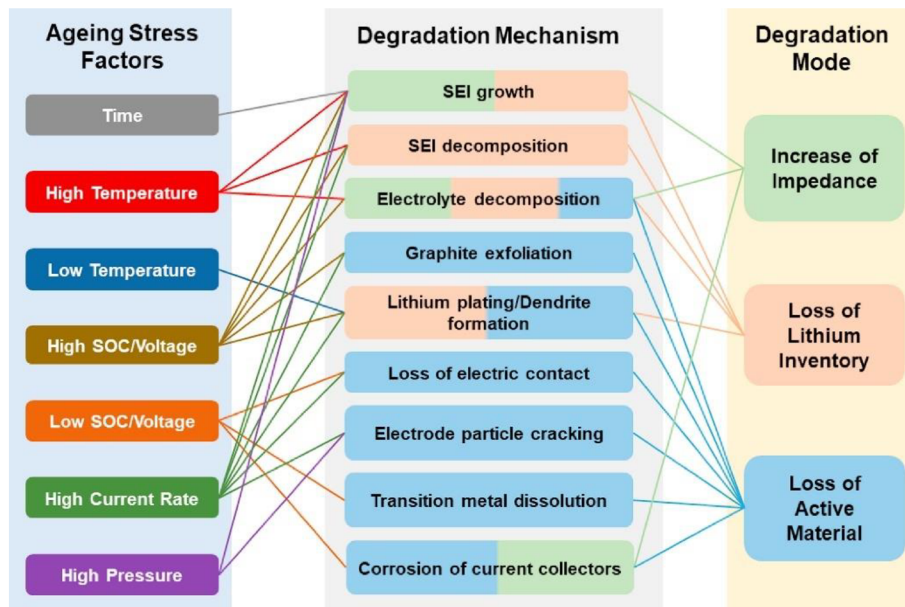


Obr. 15.: Vliv rychlosti vybíjení na vybíjecí charakteristiku a teplotu akumulátoru INR18650-25R [14]

### 2.2.4 Stav života akumulátoru SoH

Navýšení vnitřního odporu, ztráta lithiových iontů a aktivních materiálů jsou hlavní projevy stavu života. Na stárnutí článku při cyklování má vliv velikost proudu při vybíjení a nabíjení, který by u Li-ion baterií neměl dlouhodobě přesahovat 10 C [15]. Vysoká provozní teplota degraduje chemické vlastnosti elektrolytu, dochází k usazování a růstu vrstvy rozhraní pevného elektrolytu (SEI), která má za následek navýšení odporu a snížení skutečné kapacity [16]. Jak bylo zmíněno v části rozebírající vnitřní odpor článku, s množstvím cyklů, které akumulátor prošel, se navyšuje vnitřní odpor, který má vliv na vnitřní ztráty při vybíjení článku. Celkový počet úplných cyklů

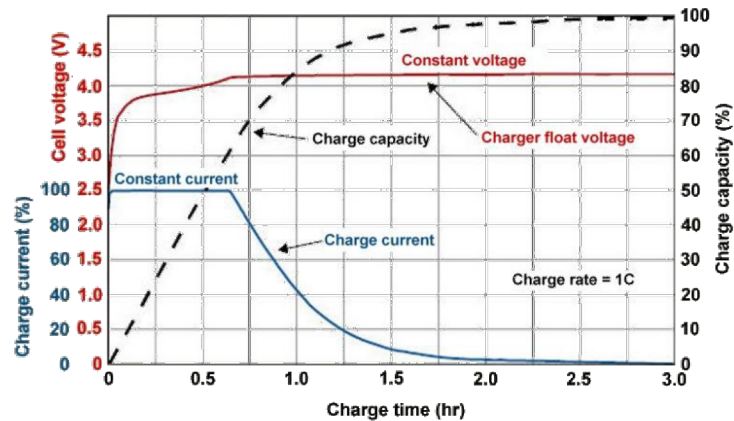
tedy může být obecným ukazatelem SoH, pokud je zaznamenáván. Akumulátor není doporučeno zatěžovat pulzně, pulzní vybíjení urychluje stárnutí [17]. V klidovém stavu, kdy akumulátor není dlouhodobě používán, má vliv skladovací teplota, SoC při skladování, a doba skladování [18]. Při skladování se uplatňuje pokles SoC samovybíjením. Obr. 16. znázorňuje faktory stárnutí, jejich mechanismus a jejich důsledky.



Obr. 16.: Vlivy na stárnutí článku [15]

### 2.2.5 Nabíjení akumulátoru

Při nabíjení Li-ion akumulátoru se běžně používá metoda CCCV (Constant Current Constant Voltage), kdy je zpočátku akumulátor nabíjen konstantním proudem a při dosažení podmínky dané konečnou hodnotou napětí akumulátoru dochází k přechodu na konstantní napětí, při kterém proud ustává a po dosažení dolního limitu proudu je proces nabíjení ukončen, jak je zobrazeno na Obr. 17.



Obr. 17.: CCCV nabíjení Li-ion akumulátoru [19]

Pro moduly s akumulátory, ať už zapojenými v sérii nebo paralelně, je potřeba nasazení systému správy baterie BMS (Battery Management System), který bere v úvahu různorodost článků a umožňuje dorovnávání nevyváženosti mezi články. Články se musí už od výroby třídit podle jejich výrobních parametrů, aby nedocházelo ke kombinaci výrazně odlišných článků. Kombinací stejných článků se nevyváženost projeví nejméně, ale postupně dochází ke stárnutí, které vede k nevyváženosti, a bez nasazení BMS nelze očekávat správnou dlouhodobou funkčnost. Pasivní systém BMS je často používán u nabíjecích zařízení, kdy jsou nabyté články s menší kapacitou vybíjeny přes odpor, aby mohlo dojít k plnému nabití zaostávajících článků. Aktivní systémy jsou schopné redistribuovat energii napříč modulem, ale vyžadují komplexnější elektroniku.

## 2.3 Metody určení parametrů a života akumulátoru

Metoda, kterou lze opakovaně a dostatečně přesně stanovit jednotlivé parametry je zásadní při snaze vytvořit strategii pro určení stavu života. Měření jsou obvykle provedena na větším souboru vzorků, u kterých je urychleno stárnutí, a pozorování je prováděno v kontrolovaných vnějších podmínkách, například za konstantní teploty okolního prostředí. Podmínky jsou systematicky měněny, aby byl zachycen jejich vliv na měřené parametry.

SoH nelze přímo změřit, získáváme je jako výsledek z měření více veličin nebo jejich časového průběhu. Takto přímo měřené hodnoty mají vlastní míru nepřesnosti, kterou je potřeba brát v úvahu při vyhodnocení.

Přechodové jevy u Li-ion akumulátorů jsou velmi dlouhé, vyrovnání teploty akumulátoru na vnější teplotu může trvat několik hodin. Vnitřní elektrochemické procesy také hrají vliv při měření a jsou doporučovány i hodinové prodlevy po nabití před začátkem vybíjení, aby došlo k ustálení elektrochemických dějů.

Indikátory jsou navzájem silně ovlivněny, jak bylo vysvětleno v předešlé podkapitole a neuvážení některého z vlivů může vést ke snížené robustnosti výsledného modelu [18].

### 3.2.1 Vybíjecí zkouška

Metoda vybití článku z plného nabití po úplné vybití za standardních podmínek a za předpokladu dostatečně přesného měření průběhu veličin napětí a proudu je pravděpodobně nejsnazší možná analýza stavu života akumulátoru, kdy je jasně určen poměr mezi skutečnou a jmenovitou kapacitou článku.

Tato metoda má své nevýhody. Je potřeba vybit články z plného nabití po dolní mez vybití a doba identifikace skutečné kapacity může trvat i několik hodin v závislosti na použitém vybíjecím proudu, který je obvykle menší jak 1 C. Opakované hluboké vybíjení urychluje stárnutí článku. Jedná se o integrační metodu, která klade zvýšené nároky na přesnost měřicího zařízení, a u které se kumuluje chyba měření. Nevýhodou metody je také potřeba elektronické zátěže pro dosažení konstantního proudu. Při vyšších vybíjecích proudech se více uplatňují změny vnitřní teploty akumulátoru

v souvislosti s teplotou okolí což má vliv na množství uvolnitelné energie a vnitřní odpor akumulátoru.

### **3.2.2 Měření impedance**

Při měření impedance se používají zkratky ACIR (Alternating Current Internal Resistance) a DCIR (Direct Current Internal Resistance).

Měření napěťové odezvy na buzení střídavým proudem a následný výpočet reálné složky ACIR se provádí na různých jednotlivých frekvencích, například na frekvenci 1kHz [20], v případě přesnější analýzy akumulátoru je provedena elektrochemická impedanční spektroskopie EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy), která otestuje odezvu akumulátoru v širším frekvenčním pásu [10]. Spektroskopie je běžně používaná ve výrobním procesu baterií jako jeden z testů kvality baterie, kdy baterie musí dosahovat nominálních hodnot vnitřní impedance ACIR [20].

Měření napěťové odezvy na stejnosměrný pulz, přesněji skokovou změnu proudu a následný výpočet DCIR se provádí komerčními přístroji obvykle v čase řádově ms, což by mělo snížit ovlivnění měření elektrochemickým procesem dvojvrstvy akumulátoru při delším sepnutí [21]. Vybíjecí a následně nabíjecí pulz je prováděn s vysokou hodnotou proudu (například 20 C), aby byla odezva u větších akumulátorů na relativně malém odporu dostatečná [21]. U pulzu by se měla projevit čistě reálná část impedance do první milisekundy [21]. Měřicí zařízení musí být schopno realizovat vybíjecí (nabíjecí) skokovou změnu proudu v čase řádově milisekund a rychleji. Synchronně musí změřit odezvu v napěťovém průběhu a poté vypočítat vnitřní odpor.



Jsou publikované práce, které zkoumají napěťovou odezvu na proudový skok v delších časech (až 100 s), kdy se uplatňují elektrochemické vlivy [10]. Celková doba trvání pulsu se omezuje s ohledem na ohřev baterie a případnou změnu SoC. Představu o míře zvýšení vnitřního odporu akumulátoru v závislosti na délce pulsu (okamžiku měření od začátku pulsu) poskytuje Tabulka 1.

Tabulka 1.: Tabulka závislosti vnitřního odporu na délce pulzu [10]

Pulse Length (s)	Internal Resistance (mΩ) for varying Rates			
	1 C	2 C	5 C	15 C
<b>From Discharge Pulse</b>				
0.1	1.35 ± 0.05	1.37 ± 0.03	1.31 ± 0.02	1.30 ± 0.01
2	1.76 ± 0.05	1.81 ± 0.03	1.72 ± 0.02	1.66 ± 0.01
5	2.07 ± 0.05	2.12 ± 0.03	1.92 ± 0.02	1.84 ± 0.01
10	2.49 ± 0.05	2.49 ± 0.03	2.12 ± 0.02	2.05 ± 0.01
<b>From Charge Pulse</b>				
0.1	1.35 ± 0.05	1.35 ± 0.03	1.32 ± 0.02	1.30 ± 0.02
2	1.76 ± 0.05	1.76 ± 0.03	1.70 ± 0.02	1.51 ± 0.02
5	2.02 ± 0.05	1.99 ± 0.03	1.85 ± 0.02	1.59 ± 0.02
10	2.33 ± 0.05	2.23 ± 0.03	2.00 ± 0.02	1.70 ± 0.02

### 3 Návrh řešení

Cílem práce je vytvoření jednoduchého zařízení pro určení stavu Li-ion akumulátorových modulů pro ruční nářadí Mirka. Stav života akumulátoru je reprezentován veličinou SoH, kterou nelze přímo změřit, ale je možno její hodnotu vypočítat na základě měření časového průběhu napětí, proudu a teploty a na základě znalosti jmenovité kapacity akumulátoru.

Pro primární stanovení SoH zkoumaných modulů akumulátorů bude použita integrační metoda měření skutečné kapacity – vybíjecí zkouška. Pro provozní stanovení SoH je implementována metoda měření vnitřního odporu baterie během analýzy napěťové odezvy na skokovou změnu odporové zátěže.

Řešením je návrh programovatelného zařízení, které umožní automatické provádění vybíjecí zkoušky, záznam průběhů naměřených veličin pro následné zpracování, automatické stanovení SoH, ovládání procesu nabíjení pro přípravu baterií na test. Pro zajištění komplexnosti a kompaktnosti je použita pevná odporová zátěž jak pro vybíjecí zkoušku, tak i pro provozní stanovení SoH měřením pulsní odezvy.

### 3.1 Postup řešení

Na základě prozkoumání požadavků zadání, prostudování dostupných literárních zdrojů, s ohledem na dostupnost zejména elektrotechnických komponent a finálně s ohledem na finanční možnosti, byl navržen systém odpovídající blokovému schématu, viz Obr.18. Systém umožňuje provádět dlouhodobé měření a záznam, zkoumání naměřených dat, ověřování navržených algoritmů pro automatické vyhodnocení a nakonec provádění vlastního testu s vyhodnocením.

V úvodní části řešení je kladen důraz na velmi přesné měření napětí na jednotlivých člancích baterie, dostatečně přesné měření proudu a teploty. Při dlouhodobém měření a záznamu dat je přiměřeně minimalizován objem dat, která jsou následně zpracována. Dostatečná přesnost měření se následně využije při provádění vybíjecí zkoušky. Pro usnadnění přenosu měřených dat je použito rozhraní pro připojení přes Ethernet do LAN. Tato komunikační linka je použitelná v případě provozního nasazení více testerů ve spojení se systémem automatické identifikace konkrétních baterií a centrální evidencí stavu baterií.

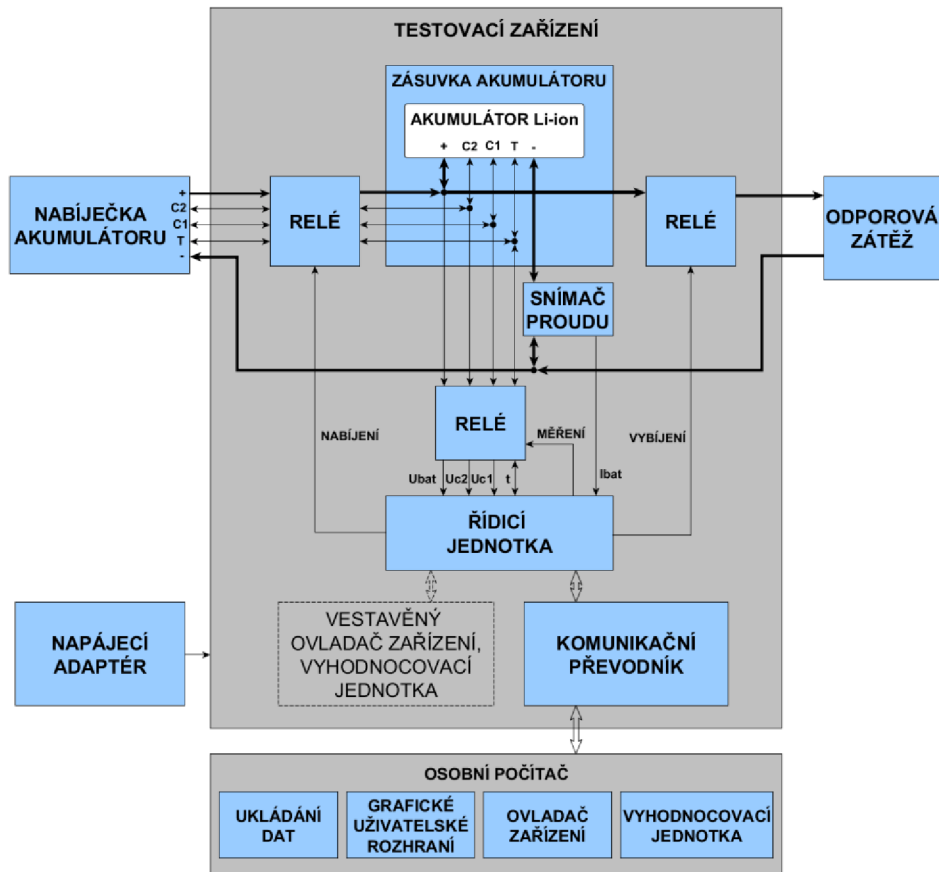
Ve snaze o univerzálnost použití navrženého zařízení se stejné řešení měřicí části použije u navrženého provozního testeru. Modifikace vlastností vstupů a případné změny v nastavení programovatelných vstupních obvodů je možno zvážit s ohledem na přesnost a reprodukovatelnost výsledků.

Požadavek na jednoduchost provádění testu souvisí s nutností vytvořit spolehlivou zásuvku pro vložení akumulátoru, která je zabudovaná v robustním pouzdře.

Je žádoucí zahrnout do komplexního řešení ovládání nabíječky pro detailní proměření nabíjecího procesu a získání představy o způsobu nabíjení a návrhu metodiky provádění vybíjecího testu, který následuje po nabíjení.

Vybíjecí zkoušky s sebou přináší ohřev zátěžového rezistoru, který je vhodné chladit mimo pouzdro testovacího zařízení a vnější umístění usnadňuje případnou změnu zátěže. Pro zjednodušení a eliminaci nežádoucích přechodových jevů (regulace zátěže) je zvolena pasivní odporová zátěž s přídavným chladičem.

Díky modularitě řešení je možno vyhodnocovací jednotku realizovat buď jako programové vybavení SW (Software) běžící na osobním počítači, který se používá pro úvodní měření a vybíjecí zkoušky, nebo je možno vyhodnocovací jednotku s přeneseným SW vestavět do pouzdra testovacího zařízení k řídicí jednotce.



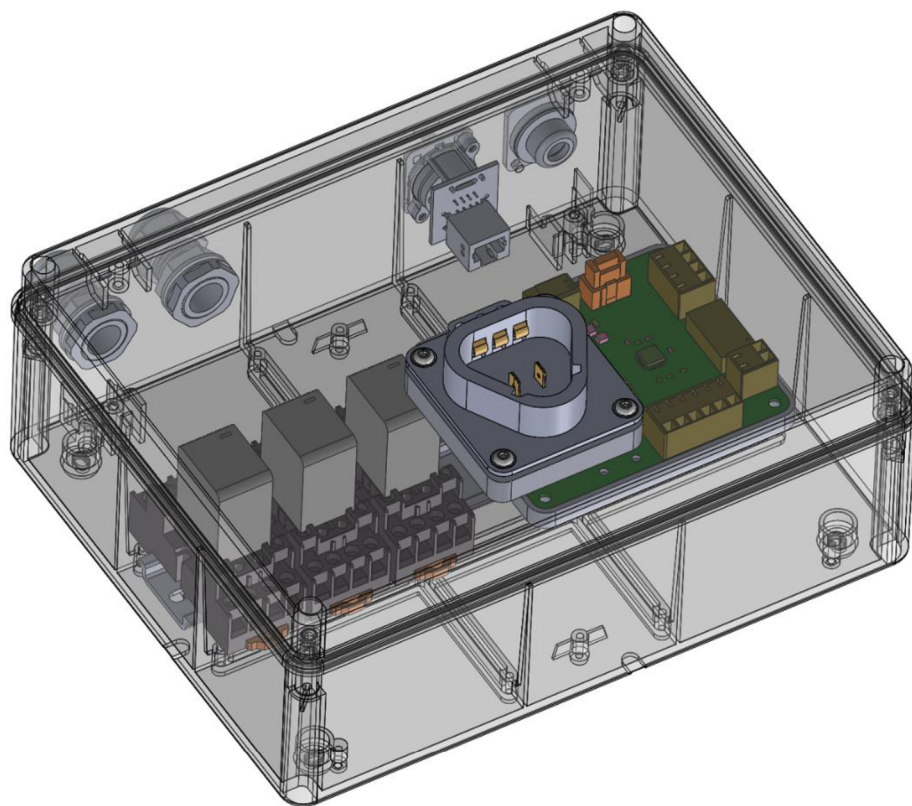
Obr. 18.: Blokové schéma testeru

Navržený systém podle blokového schéma se tedy skládá z testovacího zařízení, osobního počítače, nabíječky akumulátoru, odporové zátěže a napájecího adaptéru. Testovací zařízení je vestavěno do plastového pouzdra, v jehož víku je zabudovaná zásuvka pro akumulátor. Hlavní součástí testovacího zařízení je řídicí jednotka, která ovládá relé pro sepnutí nabíjení, relé pro sepnutí vybíjení a relé pro měření, pomocí kterého se po vložení akumulátoru připojí napětové měřicí vstupy. Jednotka umožňuje měření celkového napětí a dvou dílčích napětí mezi články akumulátoru. Dále je měřeno napětí na výstupu proudového snímače, který je zařazen ve společné větvi proudových smyček nabíjení a vybíjení. Poslední měřenou veličinou je napětí na termistoru, který je zabudovaný v modulu akumulátoru. V režimu nabíjení dodává proud do termistoru nabíječka, mimo nabíjení dodává proud do termistoru řídicí

jednotka. Komunikace řídicí jednotky s počítačem probíhá prostřednictvím kabelu se zakončovacími konektory RJ45 v síti Ethernet. Testovací zařízení je připraveno pro vestavbu ovládací a vyhodnocovací jednotky a řídicí jednotka je připravena pro sériovou komunikaci s ovládací jednotkou buď v úrovních RS232 nebo volitelně TTL. Napájecí adaptér poskytuje testovacímu zařízení bezpečné malé napětí pro řídicí jednotku, která dále napájí cívky relé, snímač proudu, snímač teploty a další vestavěná zařízení. Osobní počítač je vybaven dvěma základními aplikacemi. První umožňuje ovládání experimentů, ukládání měřených dat a vizualizaci časových průběhů veličin v reálném čase. Druhá představuje jednoduchý ovladač testeru a zobrazovač výsledku testu a je navržena jako přenositelná do vestavěné jednotky v testovacím zařízení.

### 3.2 Návrh prostorového uspořádání uvnitř modulu zařízení

Úvodní rozvaha ohledně uspořádání modulu testovacího zařízení byla provedena na základě vytvoření 3D modelu v návrhovém softwaru SOLIDWORKS 2020. Pro zabudování součástí testovacího zařízení byla zvolena přístrojová krabice SCAME 686.208, která je primárně určena pro montáž na stěnu, ale po vybavení gumovými nožkami je díky vhodným rozměrům, dostatečné tuhosti a přípravou pro montáž DIN lišty vhodná pro daný účel. Do základny krabice jsou vyfrézovány otvory pro dvě průchodky PG9, panelový konektor Neutrik NE8FDV a napájecí propojku s průchodkou do panelu, viz Příloha 1., A6-C6.



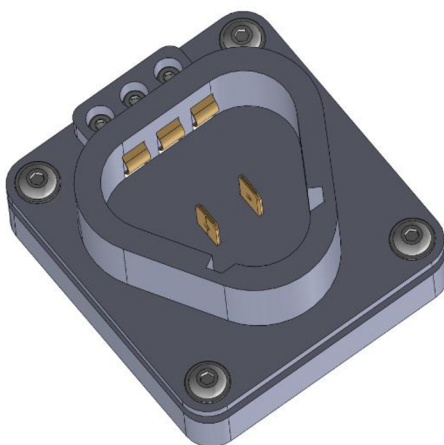
Obr. 19.: Prostorové uspořádání komponent modulu.

Uvnitř krabice, viz Obr. 19, je upevněna DIN lišta TS35 dle ČSN EN 60715 ed.2 délky 230 mm. Na DIN lištu jsou upevněny tři patice relé Weidmüller FS4CO, řídicí jednotka v nosiči Wieland Bamberg WEB 1001 a dvě montážní spony WAGO 221-500 s instalovanými svorkami (5 kusů 221-413 a 1 kus 221-415). Mimo DIN lištu je upevněn modul snímače proudu ACS70331. Vnitřní kabeláž modulu je provedena podle listu 1 elektrického schéma (Příloha 1.) vodiči H07V-K průřezu  $0,5 \text{ mm}^2$ ,

kromě okruhů, kterými teče nabíjecí nebo vybíjecí proud, kde jsou použity vodiče o průřezu 1 mm<sup>2</sup>. Konce vodičů jsou opatřeny lisovacími dutinkami.

### 3.3 Zásuvka baterie

Pro zajištění snadného a spolehlivého připojení akumulátorového modulu byla na základě návrhu 3D modelu vyrobena zásuvka, viz Obr. 20. Obsahuje dvoudílné plastové tělo, dva nožové kontakty pro připojení svorek (+), (-) a tři listové pružinové kontakty pro připojení svorek (C1), (C2) a (T) baterie. Pro výrobu nožových kontaktů byly použity krimpovací fastony typ 160451-2 od TE CONNECTIVITY, u nichž byla provedena úprava zaoblením náběžných hran. U pružinových kontaktů KEYS5231 KEYSTONE byla upravena šířka z 5 mm na 3,5 mm zbroušením. Plastové tělo bylo vyrobeno technologií FDM/FFF na 3D tiskárně Prusa i3 MK3S z materiálu PLA. Části plastového těla se montují do výřezu ve víku přístrojové krabice.



Obr. 20.: Podsestava konektoru baterie

### 3.4 Elektromagnetická relé

Jsou použita relé DRM570024LT od firmy Weidmüller v patici typ FS4CO k upevnění na DIN lištu. Jmenovité stejnosměrné napětí cívky je 24 V a odpor 650 Ω. Má 4 přepínací kontakty s odporem 50 mΩ pro proudy do 5 A při stejnosměrném napětí do 30 V. První relé připojuje baterii na měřicí vstupy pro měření tří napětí na jednotlivých člancích a napětí na termistoru. Druhé relé připojuje stejné kontakty na nabíječku. Třetí relé se používá pro připojení zátěže, volný rozpínací kontakt je

použitý pro blokování sepnutí relé nabíjení v době vybíjení. Volné kontakty jsou využité pro vícenásobné paralelní připojení zátěže.

## **3.5 Řídící jednotka**

### **5.3.1 Mikrokontroler**

Základem řídicí jednotky je mikrokontroler typu MC9S08DZ60ACLC výrobce NXP Semiconductors. Jde o 8bitový mikrokontroler z rodiny HCS08 s architekturou CISC (Complex Instruction Set Computer). Umožňuje použití interního nebo externího zdroje taktovací frekvence, aktuálně je použitý interní oscilátor s frekvencí 31,25 kHz a nastavenou frekvencí sběrnice 16 MHz. Pro program a data je k dispozici 60 kB paměti FLASH, 2 kB paměti EEPROM a 4 kB paměti RAM. Dvanácti bitový interní A/D převodník s postupnou aproximací umožňuje připojit až 10 vnějších analogových vstupů se vstupním napětovým rozsahem od 0 V po 5 V, z toho řídicí jednotka využívá jeden analogový vstup pro měření proudu a další vstup pro měření teploty baterie. Sériové rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface) slouží pro připojení externích periferních obvodů, na řídicí desce je použito pro komunikaci s externím A/D převodníkem AD7799.

Sériové komunikační rozhraní SCI (Serial Communication Interface) disponuje dvěma kanály, první kanál SCI1 je použitý pro připojení komunikačního převodníku USB-K6 pro komunikaci v síti LAN, druhý kanál SCI2 je rezervován pro připojení vestavného uživatelského rozhraní komunikujícího přes sériovou linku v režimu UART v úrovních RS232 nebo TTL, případně je možno vstup a výstup použít pro komunikaci typu I2C.

Komunikační rozhraní CAN sdílí vstup a výstup s linkou SCI2. Po doplnění obvodu přijímače/vysílače lze dodatečně připojit uživatelské rozhraní nebo jiné periferie pomocí sběrnice CAN. V tomto případě je potřeba použít externí zdroj taktovací frekvence.

### **5.3.2 Externí A/D převodník**

Je použit typ AD7799 od výrobce Analog Devices, což je 3kanálový  $\Sigma$ - $\Delta$  převodník s 24bitovým rozlišením vhodný pro měřicí aplikace, kde je požadována vysoká



přesnost. Cílem je dosažení přesnosti měření napětí odpovídající přesnosti při testování akumulátorů ve výrobě [3]. Propojení s mikrokontrolerem je realizováno přes rozhraní SPI a je umožněno digitálně nastavit zesílení a frekvenci dat na výstupu.

Převodník má vstupní napěťový rozsah od 0 do 2,5 V při naprogramovaném jednotkovém zesílení vstupu, použití vnějšího zdroje referenčního napětí 2,5 V a unipolárního režimu převodu. Při tomto nastavení se nepoužívá vnitřní buffer na napěťových vstupech, a pro dosažení nejlepší přesnosti měření je potřeba použít doporučenou kombinaci odporu a kapacity vstupních RC členů (např.  $R_{12}$ ,  $C_{19}$  pro kanál AIN3+, viz Příloha 2. a 3.) a provést impedanční oddělení od předchozích obvodů.

### 5.3.3 Zdroj referenčního napětí pro ADC

Obvod ADR421AR od výrobce Analog Devices poskytuje referenční napětí 2.5 V s počáteční přesností 3 mV (0,12 %). Vyznačuje se nízkým šumem, dlouhodobou stabilitou 50 ppm/1000h a teplotní stabilitou 10 ppm/°C. Vzhledem k použití odporových děličů napětí ve vstupních obvodech není použita možnost nastavení přesného referenčního napětí pomocí vstupu TRIM, offset a strmost lineární převodní charakteristiky je potřeba pro každý kanál ADC identifikovat pomocí kalibrace.

### 5.3.4 Vstupní zesilovače

Ve všech případech je použitý typ TLC272CD od výrobce Texas Instruments, který používá jedno napájecí napětí v rozsahu od 4 do 16 V. Jedná se o dvojitý operační zesilovač využívající technologii LinCMOS, který se vyznačuje nízkým šumem a vstupním napěťovým rozsahem od 0 V (spodní napájecí úroveň). Operační zesilovače jsou použity výhradně jako buffery s napájecím napětím 15 V na vstupech AD7799 a s napájecím napětím 5 V na vstupech A/D převodníku mikrokontroleru.

Pro snížení napěťových úrovní signálů jsou jako zeslabovače A (Attenuator) v signálových cestách použity odporové děliče napětí s koeficientem zeslabení  $K$  podle rovnice 3.

$$K = \frac{R_b}{R_a + R_b} \quad (3)$$

Pro omezení frekvenčního pásma signálů RC členy jako filtry typu dolní propust s mezní frekvencí  $f_m$  podle rovnice 4.

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (4)$$

Pro splnění Nyquistova kriteria je v kanálech měření teploty a proudu na výstupu bufferu za filtrem mezní frekvence omezena na 16 Hz a použita vzorkovací frekvence cca 20 kHz. Po A/D převodu jsou data filtrována pomocí FIR filtru typu dolní propust a následně je snížena vzorkovací frekvence decimací.

Pro AD7799 je na výstupu bufferu za filtrem nastavena mezní frekvence 16kHz, což je dostačující omezení vzhledem k principu A/D a zapojení.

### 5.3.5 Obvody pro připojení termistoru baterie

Teplota baterie je stanovena na základě měření napětí na termistoru, kterým protéká proud. Mezi svorkami T a (-) baterie byl při 25 °C změřen odpor termistoru 10 kΩ. Dále bylo zjištěno, že při připojení nabíječky BCA108 je termistor připojen na zdroj napětí 5 V a přes termistor při 25 °C protéká proud 133 μA, takže v sérii s termistorem je v nabíječce odpor 20 kΩ. Stejně podmínky napájení termistoru je potřeba zajistit při měření teploty během vybíjení. Potřebný proud snímačem je zajištěn připojením zdroje napájení +5 V pomocí spínače tvořeného tranzistory T<sub>1</sub> a T<sub>2</sub>. Při uvedení výstupu mikrokontroleru OUT\_INJ do stavu logické 1, je na otevřeném kolektoru PNP tranzistoru T<sub>1</sub> napětí +5 V snižené o napětí  $U_{CESAT}$ . Termistor je součástí napěťového děliče tvořeného dále rezistorem R<sub>34</sub> a odporovým trimrem P<sub>1</sub>. Nastavením jezdcy trimru přibližně uprostřed odporové dráhy se při konstantní teplotě nastaví ve vybíjecím režimu napětí na termistoru stejné jako v režimu nabíjení, při 25 °C je toto napětí 1,657 V.

Při nabíjení a vybíjení je potom napětí pro příslušnou teplotu měřeno po impedančním přizpůsobení a kmitočtovém omezení filtrem typu dolní propust pomocí A/D převodníku mikrokontroleru. Při 12bitovém rozlišení a vstupním napěťovém rozsahu 5 V dává A/D převodník pro 25 °C při vstupním napětí 1,657 V naměřenou hodnotu 1357, viz. výpočet rovnice (5) a (6).

$$V_{\text{výstup ADC}} = \frac{U_{\text{vstupní}}}{\frac{U_{\text{vstupní rozsah}}}{2^{12}}} \quad (5)$$

$$V_{\text{výstup ADC}} (25 \text{ °C}) = \frac{1,657}{\frac{5}{2^{12}}} = 1357 \quad (6)$$

### 5.3.6 Budiče relé

Pro spínání relé je použitý optočlen LTV-815S s transistorovým výstupem v Darlingtonově zapojení. Tyto optočleny umožňují galvanicky oddělit měřicí a řídicí obvody od obvodů spojených s vnějším napájením a jednoduše spínat cívku relé díky dostatečnému proudovému přenosu CTR (Current Transfer Ratio), v dokumentaci udávaný CTR je minimálně 600 % při vstupním proudu  $I_F = 1 \text{ mA}$  a napětí na výstupu  $U_{CE} = 2 \text{ V}$ . Pro ovládací napětí 5 V, s použitím vstupního odporu  $470 \Omega$  vychází vstupní proud optronu  $I_F = 8 \text{ mA}$ , úbytek napětí na sepnutém výstupu  $U_{CE} = 1,1 \text{ V}$  a proud cívky relé 35 mA.

### 5.3.7 Komunikační převodník pro připojení do LAN

Jednoduchý způsob připojení zařízení do sítě LAN umožňuje modul obousměrného převodníku sériové linky na Ethernet typu USB-K6 výrobce USB-IOT. Modul je na straně Ethernet nakonfigurován jako TCP server se zadanou hostitelskou adresou, např. 192.168.8.88 a portem např. 63. Na straně sériové linky je nastavena 8bitová komunikace bez parity s jedním datovým bitem a přenosovou rychlostí 20 kbps. Po připojení klienta k TCP serveru je umožněn transparentní přenos dat mezi klientem a zařízením připojeným na sériové lince na hostitelské straně.

### 5.3.8 Obvody napájení

Testovací zařízení je napájeno síťovým adaptérem 230 V, 50 Hz s výstupním stejnosměrným napětím 24 V a maximálním proudem 800 mA. Výstupní konektor adaptéru je zapojen do sousedního napájecího panelového konektoru s vnějším průměrem 5,5 mm a vnitřním průměrem 2,1 mm. Uvnitř pouzdra je napájení přivedeno na napájecí svorky řídicí jednotky.

Napětí 24 V se používá pro napájení cívek relé a galvanicky odděleného DC/DC spínaného zdroje THL3-2411, který dává na výstupu napětí 5 V. Tato napájecí úroveň je použita pro mikrokontroler, externí A/D převodník, zdroj referenčního napětí a vybrané operační zesilovače. Pro napájení dalších zesilovačů napětím 15 V je dále použitý zvyšující DC/DC zdroj TME0515S v neizolovaném zapojení. Napájení 3.3 V komunikačního převodníku zajišťuje lineární regulátor AZ1117.

### 3.6 Snímač proudu

V původním záměru bylo použití snímače ACS 712 od firmy Allegro Microsystems. Jedná se o izolovaný snímač proudu pracující na Hallově principu. Jeho výhodou je napájení ze zdroje 5 V, a výstupní napěťový rozsah přizpůsobený digitalizačním systémům se vstupním rozsahem 0 až 5 V, kde 0 A odpovídá 2,5 V, strmost převodní charakteristiky 185 mV/A, celková chyba 1,5 % při 25 °C. Nevýhodou tohoto snímače byla značná citlivost na vnější rušivé magnetické pole, snaha o zajištění magnetického stínění byla jen částečně úspěšná.

Finálně byl použit snímač od stejného výrobce s označením ACS 70331, který využívá princip GMR (Giant Magneto Resistive). Proud 0 A odpovídá výstupní napětí 1,5 V, strmost převodní charakteristiky je 200 mV/A, a celková chyba 2 % při 25 °C. U GMR technologie je deklarována větší citlivost než u tradičních Hall snímačů a potlačení soufázového magnetického rušení. Snímač vyžaduje nižší napájecí napětí než ACS712, proto je potřeba na modulu snímače proudu mít snižující stabilizátor napětí s výstupem 3,3 V. Měřené hodnoty ADC vychází pro proud 0 A a 1 A podle (7) a (8).

$$\text{Výstup ADC (0 A)} = \frac{1,5}{\frac{5}{2^{12}}} = 1228 \quad (7)$$

$$\text{Výstup ADC (1 A)} = \frac{1,7}{\frac{5}{2^{12}}} = 1392 \quad (8)$$

### 3.7 Zátěžový rezistor

Pro účely návrhu testeru není nutné srovnávat zátěžové charakteristiky u kterých jsou časové průběhy napětí vykresleny pro konstantní zátěžové proudy. Pro provedení vybíjecí zkoušky je možné provést vybíjení přes konstantní odpor a změna proudu v důsledku poklesu napětí má zanedbatelný vliv na celkovou změřenou kapacitu akumulátoru vyjádřenou ve Wh. Pro vybíjecí proudy v rozmezí od 0,2 C po 10 C byla pozorována maximální změna změřené celkové kapacity do 2,5 % [14]. Při vybíjecích proudech v rozsahu od 0,75 C do 1 C se dá očekávat snížení této změny.

Odporová zátěž AHP50W-6RF s chladičem vyráběna firmou SR PASSIVES je drátový rezistor s odporem  $6 \Omega \pm 1 \%$  pro ztrátový výkon 50 W. Při udávané maximální

teplotní změně odporu 50 ppm na 1 °C dojde při zahřátí o 20 °C ke změně odporu o 0,1 %. Na vlastní chladič odporu je dále připevněn hliníkový chladič s ventilátorem pro chlazení při vybijecí zkoušce, během které nedojde k nárůstu teploty nad 35 °C při teplotě okolí 22 °C.

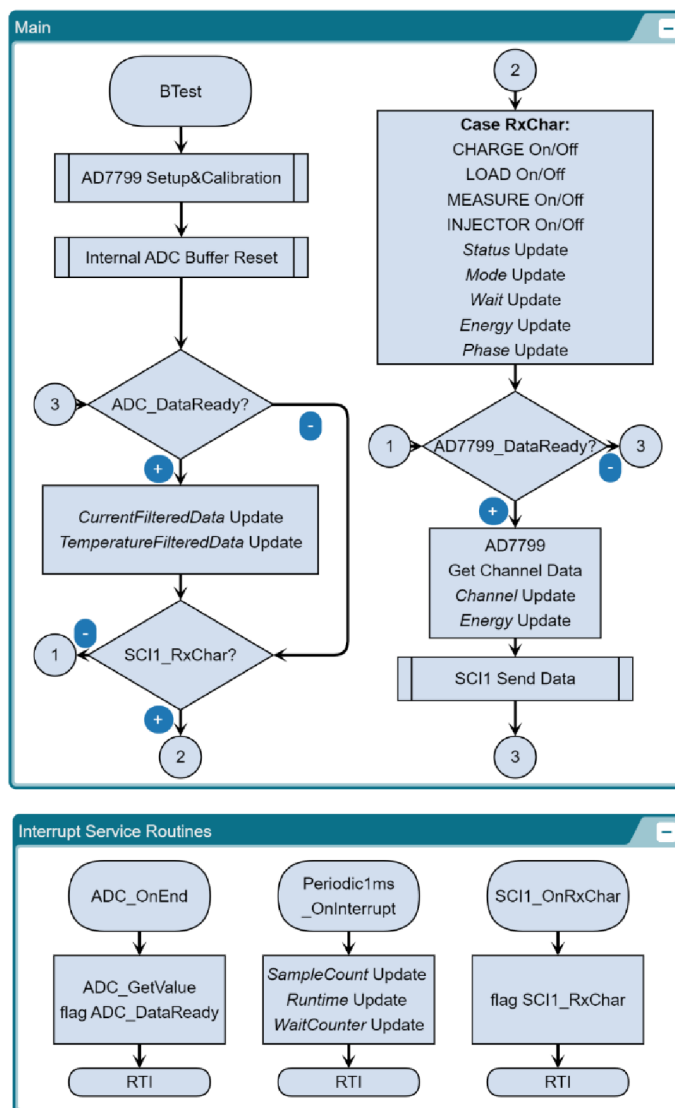
## 3.8 Software

### 8.3.1 Programové vybavení mikrokontroleru

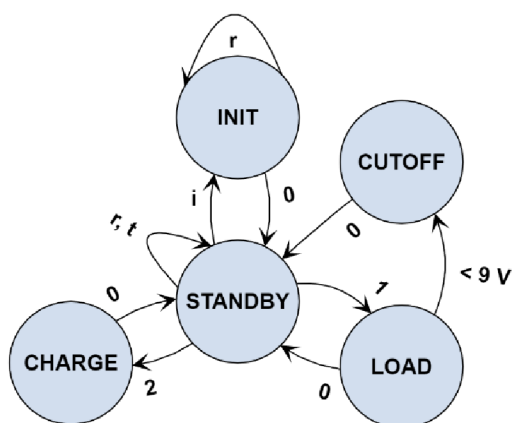
Je vytvořeno v návrhovém prostředí CodeWarrior CW MCU v11.1, které poskytuje možnost tvorby aplikace v jazyce C s podporou nástroje PE (Processor Expert), který generuje kód pro nastavení periférií, obslužné funkce a obsluhu události. Program kontroléru obsahuje tyto klíčové části:

- Inicializace komponent PE a AD7799, reset bufferů digitálních filtrů.
- Smyčka hlavního programu:
  - obsluha interního ADC,
  - zpracování přijatých povelů z SCI1,
  - obsluha AD7799,
  - obsluha ovládacích výstupů,
  - změny stavových veličin,
  - filtrace dat,
  - formátování a odesílání dat.
- Obsluha přerušení od hodin reálného času, přijímače SCI1, dokončení převodu ADC.

Sled událostí v programu je znázorněn ve vývojovém diagramu na Obr. 21. a diagram pracovních stavů je vidět na Obr. 22.



Obr. 21.: Vývojový diagram programu mikrokontroleru



Obr. 22.: Diagram pracovních stavů

### 8.3.2 Komunikace

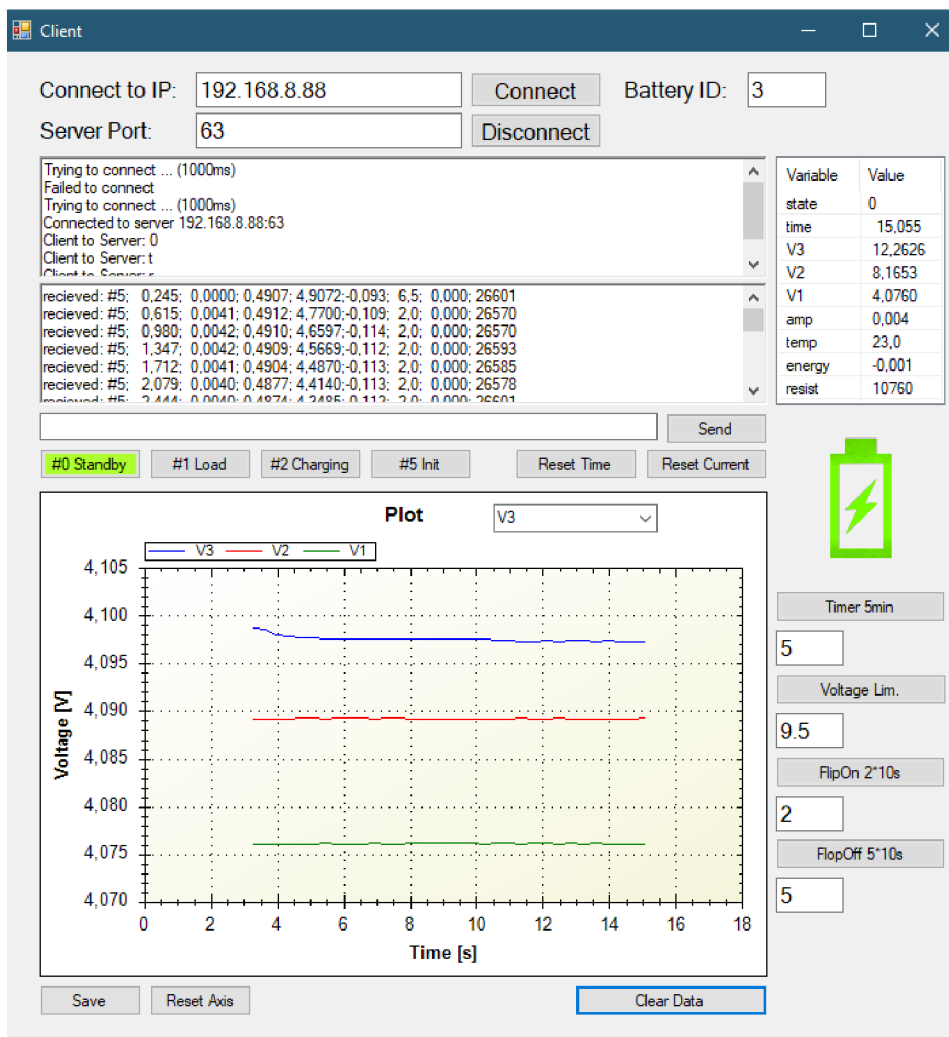
Po získání dat ze všech 3 kanálů AD7799 jsou tato data včetně dat z interního ADC a stavových veličin zformátována do zprávy pro odeslání přes vysílač SCI1, kde data přebírá modul USB-K6, který zprávu předává klientu připojenému přes Ethernet. Odesílaná zpráva obsahuje celkem 66 znaků. Zpráva začíná znakem '#', dále obsahuje data sestupně dle Tabulky 2., která jsou oddělena znakem ';' a je ukončena terminátory <CR><LF>. Řídící jednotka přijímá přes SCI1 povely formátu jednoho znaku podle Tabulky 3.

Tabulka 2.: Data obsažená ve zprávě			
Stav	0	0 = STANDBY 1 = LOAD 2 = CHARGE 5 = INIT 6 = CUTOFF REACHED	
	Min. hodnota	Max. hodnota	
Čas	0,000s	9999,999	[s]
Napětí V3	0,0000	99,999	[V]
Napětí V2	0,0000	99,999	[V]
Napětí V1	0,0000	99,999	[V]
Proud	-9,999	9,999	[A]
Teplota	0,0	49,5	[°C]
Energie	-99,999	99,999	[Wh]
R Termistoru	00000	99999	[Ω]

Tabulka 3.: Řídící znaky	
znak	akce
0	Přechod do STANDBY
1	Přechod do LOAD (pouze z 0)
2	Přechod do CHARGE (pouze z 0)
i	Přechod do INIT
t	Nulování Runtime
r	Nulování Current

### 8.3.3 Počítačová aplikace pro záznam

Volba prostředí Visual Studio 2022 byla ovlivněna obsahem šablony Windows Forms Application, která umožňuje snadnou tvorbu aplikace pracující pod systémem Microsoft Windows. Výsledná aplikace disponuje jednoduchým grafickým rozhraním a snadnou přenositelností. Interakce uživatele s grafickým rozhraním vyvolává události, na které jsou navázány příslušné obslužné podprogramy. Pro inicializaci a správu síťového rozhraní je použita knihovna SuperSimpleTcp [22] a pro vykreslení průběhů napětí do grafu je použita knihovna ZedGraph [23].



Obr. 23.: Vzhled Windows Forms Aplikace uzpůsobené pro záznam a ukládání měřených dat.

Okno aplikace, viz Obr. 23., obsahuje textová pole pro úpravu adresy a portu TCP serveru, který běží na modulu USB-K6 v testovacím zařízení. Dvě tlačítka slouží pro manuální připojení a odpojení. Jakmile dojde k úspěšnému připojení, jsou



asynchronně přijímána data, která jsou řazena do vstupního bufferu. Časovač každých 250 ms startuje čtení nových dat z bufferu, nová zpráva je zobrazena v textovém poli, dochází k aktualizaci zobrazených veličin a zařazení veličin do datového pole. Pokud hodnoty příchozích dat odpovídají hodnotám z pracovního rozsahu akumulátoru, je indikován stav připojeného modulu změnou barvy ikony baterie z červené na zelenou.

V pravém horním rohu se nachází pole pro identifikační číslo baterie, které se uplatňuje v názvu souboru při ukládání dat stiskem tlačítka Save. Název souboru je spojení aktuálního data a času, a identifikátoru modulu. Uložení probíhá pomocí objektu StreamWriter do složky Data umístěné v pracovní složce aplikace. Data jsou uložena v nekomprimovaném tvaru v textovém formátu \*.csv a jako oddělovač je použit středník. Pro hodinu záznamu dat je potřeba přibližně 0,5 MB diskového prostoru.

Dále aplikace obsahuje tlačítka, která usnadňují odesílání příkazů pro změnu stavu a nulování času, nulování offsetu proudu, mazání dat, obnovení rozvržení grafu, aktivaci časovačů a limit konečného napětí pro vypnutí vybíjení ze strany aplikace.

## 4 Postup měření a analýza zaznamenaných dat

### 4.1 Měření a zpracování dat

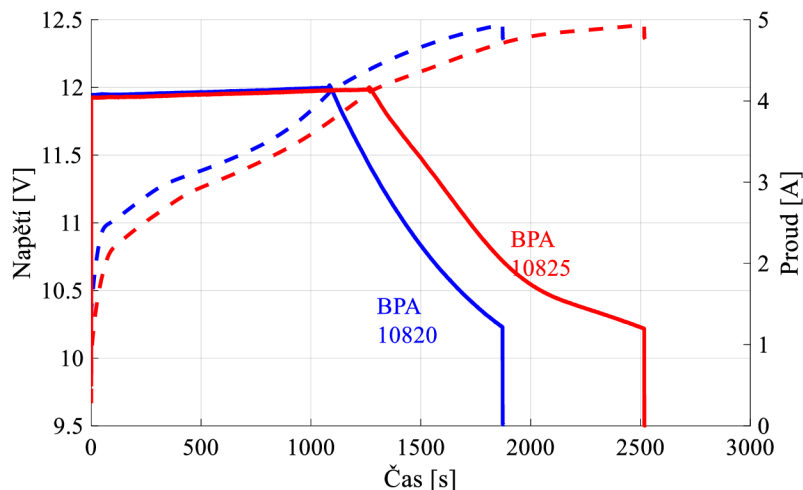
Měření byla prováděna na zapůjčených modulech BPA10820 a BPA10825. Akumulátory byly vybrány zaměstnanci firmy REHAU podle pozorovaných projevů snížené kapacity. Další skupinou byly akumulátory nové nebo krátce používané. Bylo poskytnuto 10 kusů akumulátorů BPA 10820 a 9 kusů akumulátorů BPA 10825. Jednotlivé moduly byly následně označeny samolepicí etiketou s číslem pro jejich jednoznačnou identifikaci.

Po sestavení, naprogramování a kalibraci testovacího zařízení byla měření prováděna průběžně v období od dubna do května podle následující metodiky.

Zapůjčené akumulátory byly po převzetí temperovány na teplotu okolí po dobu alespoň 4 h. Teplota okolí byla měřena přesným laboratorním teploměrem s dělením teplotní stupnice 0,1 °C. Před provedením prvního měření byl každý akumulátor částečně vybit po dobu 15 min proudem přibližně 1 C a poté plně nabit pomocí nabíječky BCA 108, po ukončení nabíjecího režimu vyjmut z nabíječky a ponechán k ustálení po dobu minimálně 4 h. Tímto byl akumulátor uveden do srovnatelného počátečního stavu.

U prvních měření byl prováděn záznam nabíjecí charakteristiky akumulátoru. Z nabíjecích charakteristik je pozorováno rychlonabíjení, maximální konstantní proud je přibližně 4 A, nabíjecí napětí nepřekročí 12,46 V. V případě nabíjení z plného vybití dosahuje teplota uvnitř modulu na povrchu článku 36 °C při teplotě okolí 22 °C. Časový průběh napětí znázorněný přerušovanou čarou a nabíjecího proudu je znázorněný plnou čarou je na Obr. 24.

Pro určení kapacity akumulátoru je jako možná alternativa k vybíjecí zkoušce použitelná integrace energie při procesu nabíjení. Integrace energie při procesu nabíjení je možná alternativa k vybíjecí zkoušce, nicméně akumulátory ve výrobním procesu nejsou plně vybíjeny, takže pro jednotnost testů by byla potřeba dodatečného vybití a následného nabíjení. Nářadí Mirka například neumožní vybíjení pod 9,5 V.



Obr. 24.: Průběh nabíjení modulů BPA 10820 a 10825

Vzhledem k významnému ohřevu akumulátorů při nabíjení je nutné před prováděním dalších zkoušek ponechat čas na vyrovnání teploty akumulátoru a okolí a současně počkat na ustálení probíhajících chemických dějů. Výrobce článku SAMSUNG doporučuje minimální čas na ustálení po nabíjení 1 h, s ohledem na zapouzdření akumulátoru je vhodné dodržovat delší doby ustálení například 4 h a za stejných okolních teplot metodicky tyto doby používat.

Vzorky akumulátorů byly dále podrobeny vybíjecím zkouškám, na základě kterých byla stanovena skutečná kapacita a následně stav života SoH podle vztahu (9)

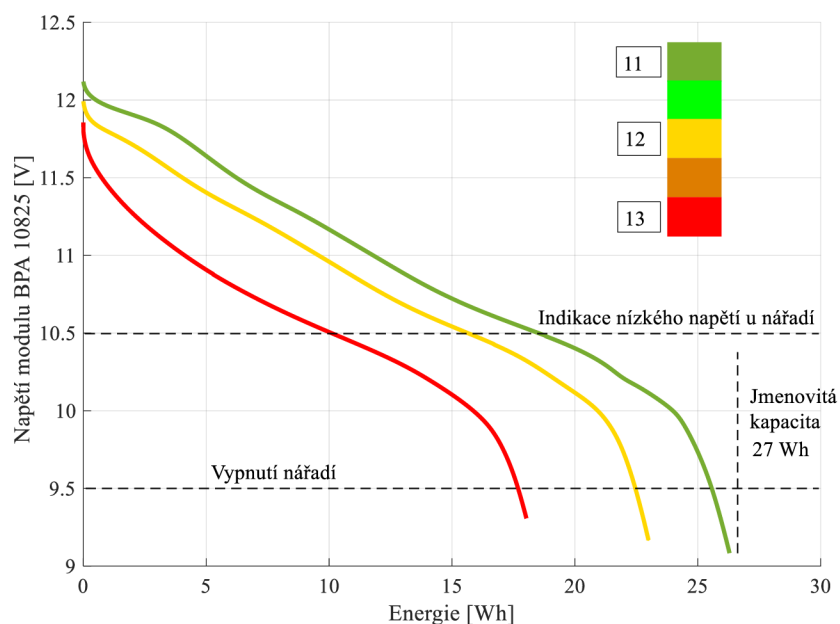
$$SoH [\%] = \frac{Energie_{skutečná} [Wh]}{Energie_{jmenovitá} [Wh]} \cdot 100 \quad (9)$$

Akumulátory nebyly vybíjeny po jejich udávané konečné napětí 2,5 V podle údajů výrobce, ale po napětí 3 V. Tímto je systematicky snížena měřená energie o přibližně 2 % [3].

U akumulátorů, které byly vybrány jako nevyhovující, byla stanovena vybíjecí zkouškou hodnota SoH menší nebo rovna 76 %. Na základě toho byl určen celkový rozsah pro vyhovující klasifikaci od 77 do 100%. Toto pásmo bylo rozděleno rovnoměrně na 4 klasifikační intervaly označené A, B, C, D. Nevyhovující pásmo má označení E, viz. Tabulka 4.

	Interval				
	A	B	C	D	E
Horní mez [%]	100	94	88	82	76
Dolní mez [%]	95	89	83	77	0

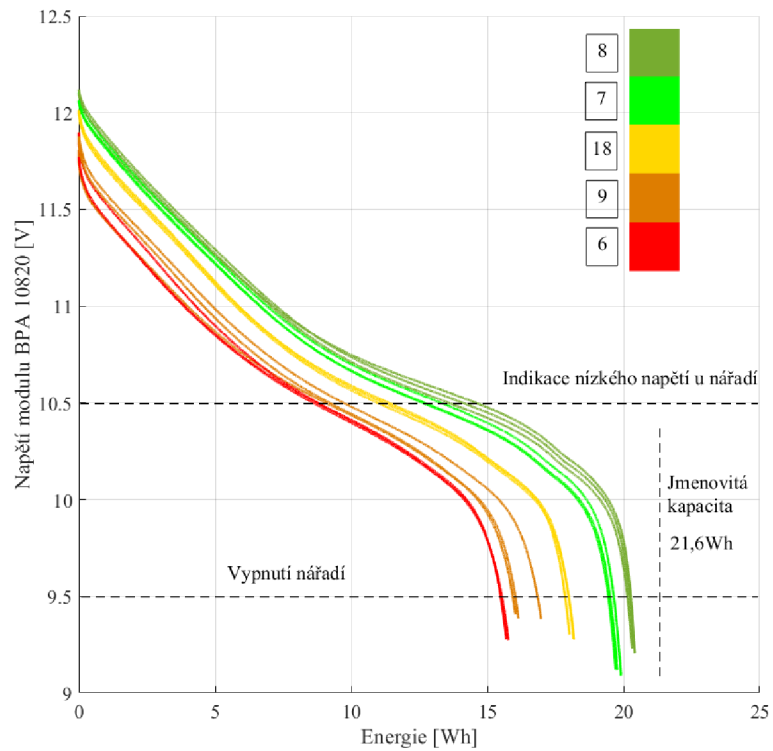
Zařazení akumulátorů do klasifikačních intervalů podle vybíjecí zkoušky je názorně vidět na vybíjecích charakteristikách pro akumulátory BPA10825 podle Obr. 25. a Tabulky 5.



Obr. 25.: Průběh napětí při vybíjení modulu BPA 10825 v závislosti na energii

ID Akumulátoru	Měření energie [Wh]	SoH [%]	
11	26,3	0,97	A
12	23,0	0,85	C
13	18,0	0,67	E

Obdobně je zařazení pro akumulátory BPA10820 vidět podle Obr. 26. a Tabulky 6.



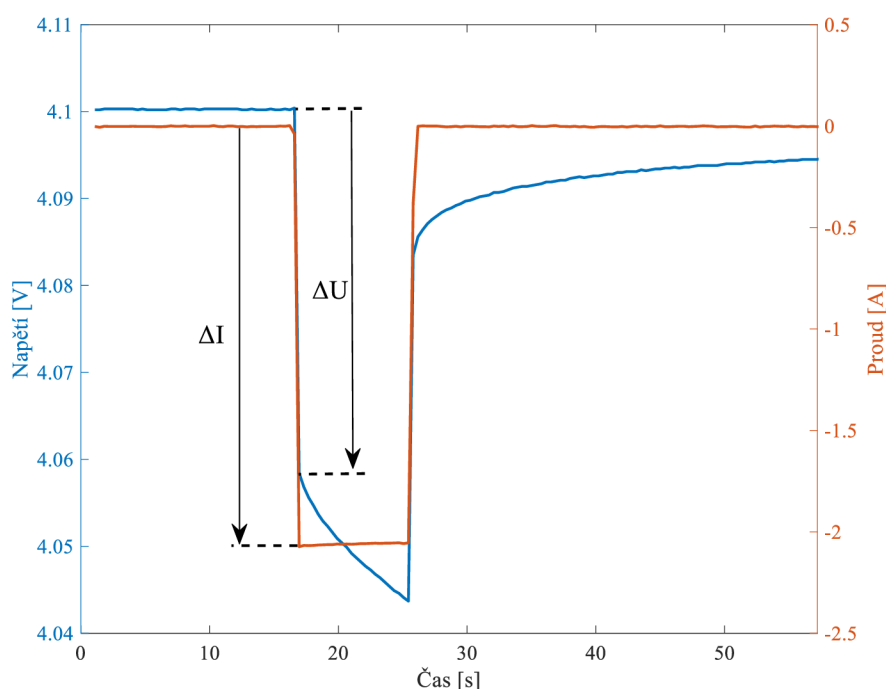
Obr. 26.: Průběh napětí při vybití modulu BPA 10820 v závislosti na energii

Tabulka 6.: Vybíjecí zkouška BPA 10820, Jmenovitá kapacita 21,6 Wh						
ID Akumulátoru	Měřená energie [Wh]				SoH [%]	
	1.	2.	3.	Průměr		
1	18,6	18,7	18,6	18,6	86,1	C
3	16,3	16,2	16,3	16,3	75,3	E
6	15,7	15,5	15,7	15,6	72,4	E
7	19,5	20,1	20,9	20,0	92,7	B
8	20,3	20,8	21,4	20,7	95,8	A
9	16,6	17,0	17,0	16,9	78,0	D
16	16,2	17,1	16,8	16,7	77,2	D
17	17,2	17,7	17,3	17,4	80,5	D
18	18,0	18,2	18,2	18,1	83,9	C
19	16,0	16,3	16,5	16,2	75,2	E

Před prováděním pulsní zkoušky se akumulátory musí nabít. Dále je potřeba dodržet stanovenou dobu ustálení (např. 4 hodiny) za standardizovaných podmínek (při teplotě okolí 22 °C). Pulsní zkouška je prováděna v krátkém časovém intervalu, během kterého se změří napětí naprázdno a následně při zatížení odporovou zátěží se změří změna proudu  $\Delta I$  a změna napětí  $\Delta U$  na svorkách akumulátoru. Napětíový skok se měří ve vhodném časovém okamžiku, kdy se minimálně uplatňují na narůstajícím vnitřním odporu akumulátoru elektrochemické děje. Následně je vypočítán vnitřní odpor podle vztahu (10).

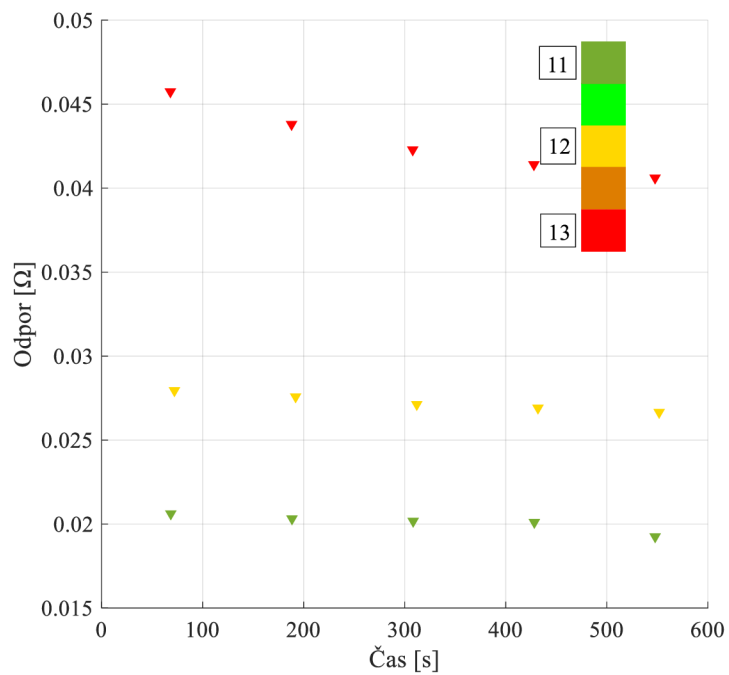
$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (10)$$

Zaznamenaný reálný průběh napětí a proudu vybíjecího pulsu je vidět na Obr. 27.

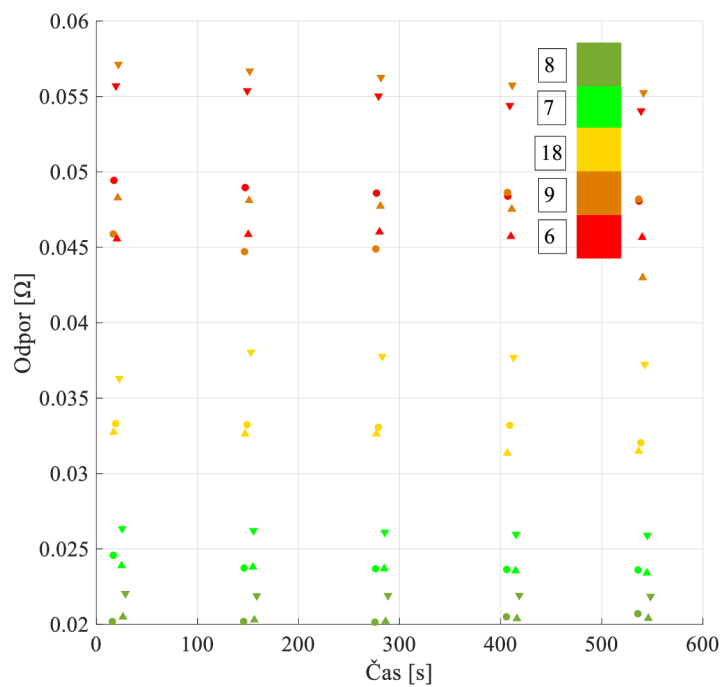


Obr. 27.: Průběh napětí a proudu při vybíjecím pulsu

Během vybíjecího pulsu je akumulátor zatěžován po dobu 10 s proudem 2 A. Z obrázku Obr. 28., který porovnává výsledky stanovení vnitřního odporu jednoho článku tří různých akumulátorů BPA10825 při sérii pěti vybíjecích pulsů v čase vzdálených 2 minuty je vidět trend zmenšujícího se vnitřního odporu článků v souvislosti s probíhajícími elektrochemickými ději.



Obr. 28.: Odporů naměřených při 10 s vybíjecích pulzech  
1 článku z BPA10825 (▼21,5 °C)



Obr. 29.: Odporů naměřených při 10 s vybíjecích pulzech  
1 článku z BPA10820 (▲24 °C ▼21,5 °C ●23,5 °C)

Pulsní zkouška je obdobně prováděná s akumulátory BPA10820. Za proměnných teplotních podmínek vykazuje značnou variabilitu stanoveného vnitřního odporu, viz Obr.29. Lze však konstatovat že skupiny měření pro různé akumulátory jsou zřetelně odlišitelné. Komplikovanější situace je u horších akumulátorů, kde však již vybíjecí zkouška klasifikuje akumulátorové moduly číslo 9 a 6 poměrně blízko sebe. Pulsní zkouška dává pro tyto dva moduly shodný výsledek s vybíjecí zkouškou jen za standardizovaných podmínek, při teplotě okolí 22 °C.

## 4.2 Regrese a klasifikace

Úkolem je odhadnout stav života na základě změření vnitřního odporu akumulátoru. Měřená hodnota vnitřního odporu je ovlivněna řadou faktorů. Projevují se vlivy teplotní, a vlivy použití nepřesného načasování zachycení vzorku napětí během pulsní zkoušky.

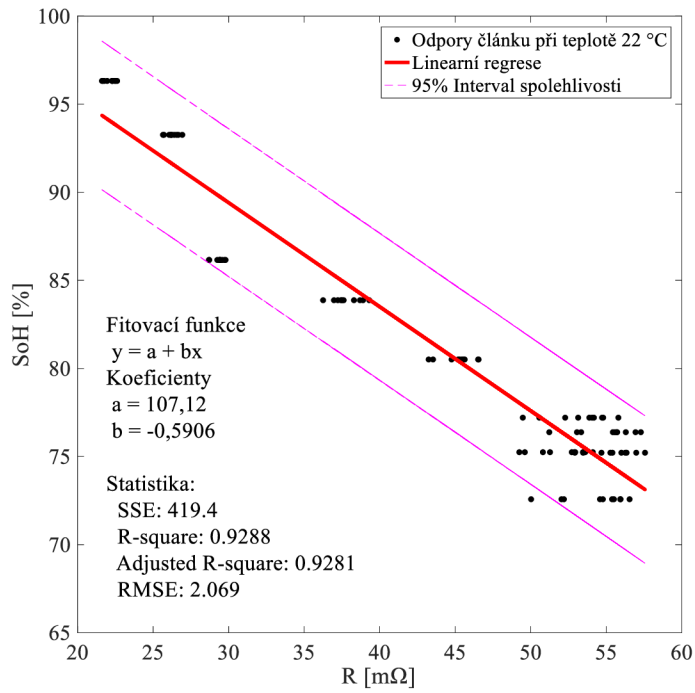
Aby byl možný automatický odhad určení SoH akumulátoru po proběhnutí pulsního testu, je potřeba stanovit funkční závislost mezi měřeným vnitřním odporem a SoH. Funkční vztah získáme porovnáním SoH měřených vybíjecí zkouškou s vnitřním odporem. Vzhledem k nízkému počtu vzorků je obtížná volba typu regresní funkce, pro jednoduchost otestujeme lineární regresi (11) a mocninnou regresi (12).

$$y = a + b \cdot x \quad (11)$$

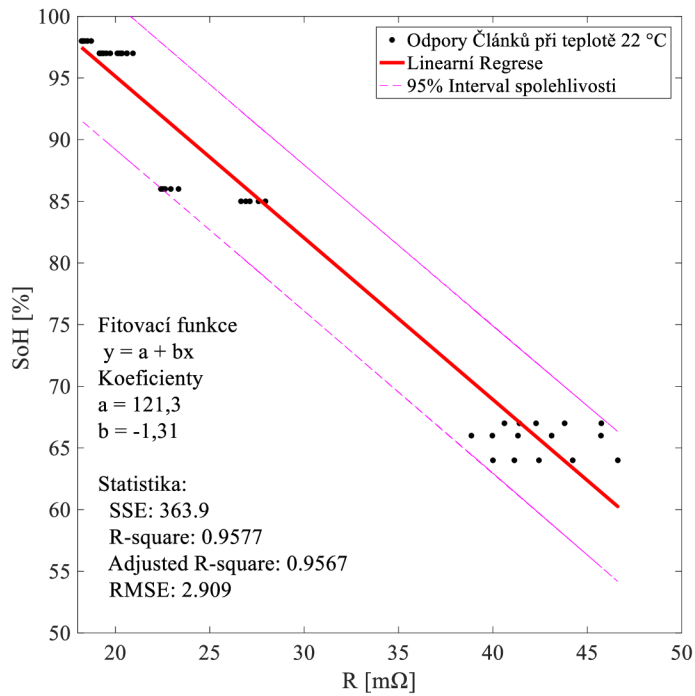
$$y = a \cdot x^b \quad (12)$$

Podle příložených grafů lineární regrese, viz Obr. 30. a Obr. 31., a mocninné regrese, viz Obr. 32., lze pozorovat, že identifikace SoH v oblasti vysokého vnitřního odporu bude zatížena nejmenší chybou vzhledem k vyššímu počtu vzorků v dané oblasti. Pro praktické použití je rozhodující nastavení mezního SoH pro vyřazení nevyhovujícího akumulátoru (hranice mezi intervaly D a E). Pro námi analyzovanou množinu dat má mocninná regrese nižší celkový součet residuálních čtverců.

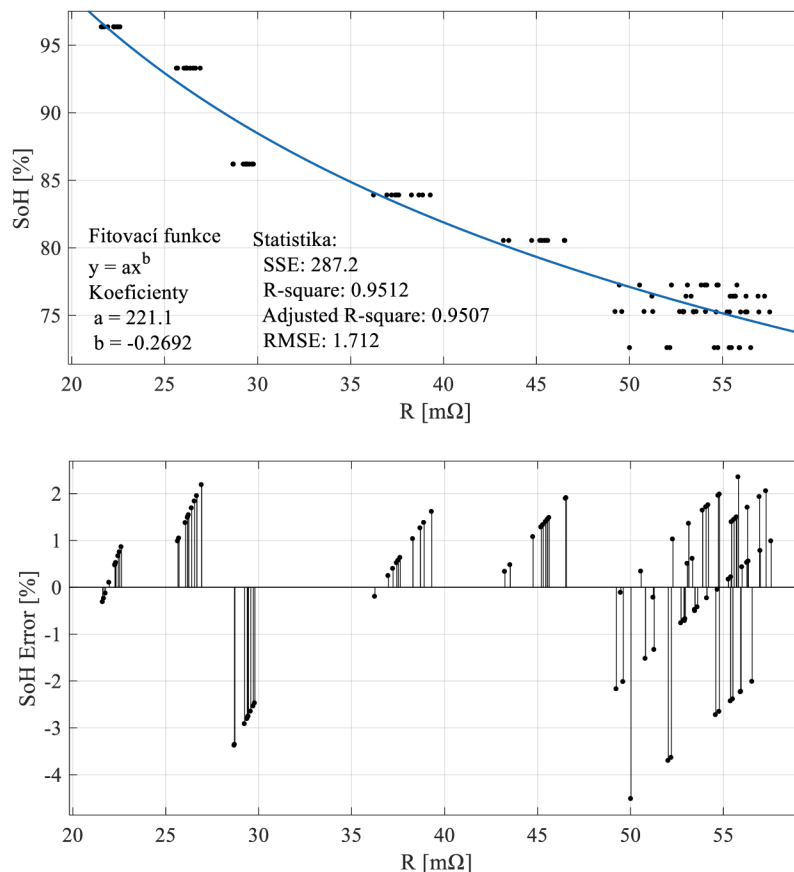




Obr. 30.: Proložení dat regresní přímkou pro BPA10820



Obr. 31.: Proložení dat regresní přímkou pro BPA10825



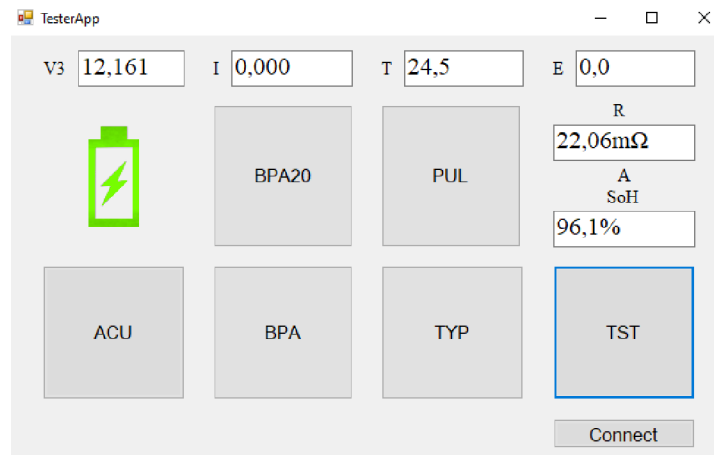
Obr. 32.: Proložení dat mocninnou regresní křivkou

### 4.3 Aplikace pro rychlou detekci SoH nabitých akumulátorů

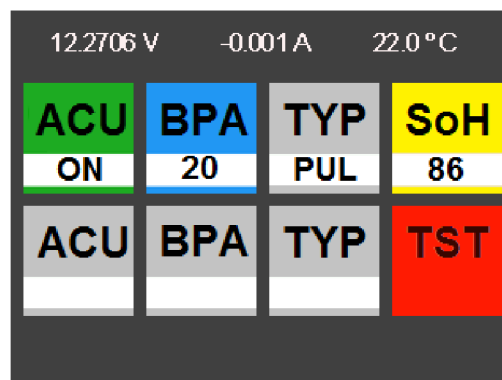
Pro účely rychlé detekce stavu života akumulátorů, které byly předem plně nabity, byla navržena aplikace s jednoduchým uživatelským rozhraním, viz Obr. 33., která po stisku jednoho tlačítka provede rychlou zkoušku životnosti a během několika sekund zobrazí výsledek. Vzhled a ovládání aplikace jsou minimalizovány pro zajištění snadné přenositelnosti na jednoduchý dotykový vestavný displej. Pro ovládání mohou být použita mechanická tlačítka nebo dotyková obrazovka. Aplikace obsahuje následující výstupní grafické objekty:

- ACU – zobrazuje stav akumulátoru (připojen / nepřipojen),
- BPA – zobrazuje typ akumulátoru (BPA10820 / BPA10825),
- TYP – zobrazuje typ zkoušky (vybíjecí / rychlá pulsní),
- SOH – zobrazuje výsledek zkoušky (% a barva podkladu),
- TST – startuje zkoušku.

Při ovládání aplikace, která běží na PC se používají odpovídající pozice grafických objektů. V případě použití vestavěného modulu s dotykovým displejem s rozlišením  $320 \times 240$  px je ovládání obdobné, viz Obr. 34., jako na PC nebo se vedle grafického displeje použijí panelová tlačítka.



Obr. 33.: Vzhled počítačové aplikace s rychlým testem



Obr. 34.: Návrh vzhledu testovací aplikace pro dotykové obrazovky

#### 4.4 Ověření funkčnosti testeru

Ověření funkčnosti bylo provedeno za teploty blíží se teplotě dat použitých pro regresi, aby byl co nejvíce potlačen vliv teploty na změnu vnitřního odporu. Z logistických a organizačních důvodů bylo obtížné uvolňovat větší množství akumulátorových modulů z výrobního procesu, proto byl test funkčnosti aplikace proveden na stávajících 10 akumulátorech BPA10820. Porovnáním stejných akumulátorů lze tedy očekávat výsledky přiřazení a jejich chybu blíží se hodnotám zobrazeným na Obr. 32. Aplikací byla vyhodnocena celá skupina akumulátorů BPA10820, výsledky jednotlivých přiřazení jsou vyneseny v Tabulce 7.

Tabulka 7.: Tabulka odhadu SoH z měření pulsní zkouškou										
ID	1	3	6	7	8	9	16	17	18	19
N	Odhadované hodnoty SoH [%] po měření vnitřních odporů pulsní zkouškou									
1.	88,1	75,8	75,3	91,1	95,3	76,3	76,8	79,5	83,2	75,3
2.	88,4	75,8	75,4	91,6	95,5	77,4	75,7	80,1	83,1	75,0
3.	88,7	76,1	75,7	91,4	95,3	75,4	76,5	79,1	84,7	77,4
4.	88,9	76,0	75,7	92,1	95,9	75,4	77,1	79,5	83,3	76,4
5.	88,9	76,2	75,6	91,6	96,3	76,1	77,3	79,9	83,5	75,7
6.	88,9	76,1	75,9	91,4	96,1	75,4	75,8	80,1	84,0	75,1
7.	89,1	76,8	75,7	91,4	96,2	75,7	77,5	79,3	83,7	75,2
8.	89,0	76,7	75,8	91,6	95,9	75,7	75,9	79,9	83,6	75,7
9.	89,2	76,4	75,8	92,0	96,7	76,2	76,8	79,6	84,6	75,6
10.	89,0	76,2	75,7	92,2	96,0	76,4	76,8	79,8	83,4	75,1
$\bar{x}$	88,8	76,2	75,7	91,6	95,9	76,0	76,6	79,7	83,7	75,7
	C	E	E	B	A	E	E	D	C	E
s	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6	0,3	0,6	0,7
	Srovnávací hodnoty SoH [%] měřené vybíjecí zkouškou									
$x_{ref}$	86,1	75,3	72,4	92,7	95,8	78	77,2	80,5	83,9	75,2
	C	E	E	B	A	D	D	D	C	E
$x_{ref} - \bar{x}$	-2,7	-0,9	-3,3	1,1	-0,1	2,0	0,6	0,8	0,2	-0,5
$\delta\bar{x}$	-3,2	-1,2	-4,5	1,1	-0,1	2,6	0,8	1,0	0,2	-0,6

Funkčnost testovacího algoritmu aplikace je takto ověřena. Pro nasazení ve větším rozsahu, kdy bude k dispozici více akumulátorů pro identifikaci funkční závislosti

a za předpokladu použití v teplotně stabilizovaném prostředí se nevyklučuje použití lineární regrese mezi výstupní hodnotou SoH a vstupní hodnotou vnitřního odporu. Pro další zpřesnění regresní analýzy je nutné provést měření na větším počtu vzorků, které rovnoměrně pokrývají celou škálu hodnot zejména v oblasti vyhovujícího SoH (především intervaly B, C).

U delších měření vnitřního odporu byly pozorovány významné změny teploty akumulátoru i v případě, že se v akumulátoru neuvolňovalo ztrátové teplo. Příčinou je teplejší povrch víka pouzdra systému ve srovnání s teplotou okolí. Není tedy vhodné, aby akumulátor s teplotou vyrovnanou na teplotu okolního prostředí byl dlouho v kontaktu s měřicí patičí, která není od pouzdra tepelně izolována. Během rychlých testů prováděných metodicky v krátkém čase by měl být tento nedostatek eliminován. Vhodná bude změna umístění patice akumulátoru případně přerušení tepelného mostu.

## 5 Závěr

Cílem práce je přispět k vyloučení komplikací spojených s používáním stárnoucích akumulátorů v ručním nářadí. Při včasné detekci dosluhujícího akumulátoru lze zabránit materiálovým škodám a časovým ztrátám ve výrobě. Podle zadání bylo potřeba navrhnout zařízení, které provede rychlý a jednoduchý test a které bude možno svěřit relativně nekvalifikované pouze proškolené obsluze.

Bylo potřeba seznámit se s obecnou problematikou ověřování vlastností Li-ion akumulátorů a zejména akumulátorů Mirka BPA108xx používaných ve výrobě u firmy REHAU. Na základě rešerše byly stanoveny požadavky na zařízení a na metodiku měření a vyhodnocení. Byly zvoleny dvě metody pro stanovení stavu života akumulátoru. V prvním případě se jedná o spolehlivou vybíjecí zkoušku, která však má své nevýhody pro praktické používání, ve druhém případě jde o rychlý test založený na měření odezvy na vybíjecí puls.

Byl navržen testovací systém, který se použil pro dlouhodobá měření v experimentální fázi vývoje a následně jako součást testeru pro provádění rutinní zkoušky. Rutinní zkoušky je možno provádět v konfiguraci jednoduchého testeru s okamžitým zobrazením, který pracuje na různých platformách. Důraz je kladen na ergonomii z hlediska manipulace s akumulátory a ovládání systému. Pro dosažení optimálních výsledků z hlediska přesnosti a opakovatelnosti je potřeba dodržovat předepsanou metodiku testování.

Vybíjecí zkouška umožnila zařazení akumulátorů do skupin podle stavu života z hlediska skutečné kapacity.

Experimenty popsaly přesně chování nabíječek akumulátorů a přispěly k tvorbě metodiky testování v souvislosti s identifikací nabíjecích proudů a souvisejícího ohřevu.

Byly prověřeny souvislosti mezi stavem života a hodnotou vnitřního odporu získaného během pulsního vybíjecího testu.

Pro nasazení testeru ve výrobě je potřeba provést úvodní orientační test na další skupině akumulátorů, následně získat co největší množinu dat, tato data analyzovat a výsledky analýzy použít při úpravě programového vybavení testeru.

## 6 Seznam zdrojů

- [1] CHAPMAN, Becky. How does a lithium-Ion battery work?. *Let's talk science* [online]. September 23, 2019 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://letstalks-science.ca/educational-resources/stem-in-context/how-does-a-lithium-ion-battery-work>
- [2] Mirka Intelligent Battery BPA 10825 10.8V 2.5Ah. *Mirka* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.mirka.com/en/p/Mirka-Intelligent-Battery-BPA-10825-10-8V-2-5Ah>
- [3] *Datasheet-pdf.com: Samsung INR18650-20R* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://datasheet-pdf.com/PDF/INR18650-20R-Datasheet-Samsung-799163>
- [4] *Datasheet-pdf.com: Samsung INR18650-25R* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://datasheet-pdf.com/PDF/INR18650-25R-Datasheet-Samsung-839321>
- [5] *Informační systém Uvádění výrobků na trh: Terminologická databáze (TDB)* [online]. ÚNMZ [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.nlfnorm.cz/terminologicky-slovník>
- [6] BUCHMANN, Isidor. BU-802a: How does Rising Internal Resistance affect Performance? *Battery University* [online]. Coalescent Design [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-802a-how-does-rising-internal-resistance-affect-performance>
- [7] JUAREZ-ROBLES, Daniel, Anjul Arun VYAS, Conner FEAR, Judith A. JEEVARAJAN a Partha P. MUKHERJEE. Overdischarge and Aging Analytics of Li-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2020, 167(9) [cit. 2023-05-23]. ISSN 0013-4651. Dostupné z: doi:10.1149/1945-7111/aba00a
- [8] HALI, Roy.: *Testing of Lithium Ion Batteries Low-frequency AC-IR vs DC-IR Method* [online]. 2020 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://fhi.nl/app/uploads/sites/74/2020/02/Batenburg-Mechatronica.pdf>
- [9] WU, Wenzhuo. *Charging time estimation and study of charging behavior for automotive Li-ion battery cells using a Matlab/Simulink model*. Stockholm, Sweden, August 2016. DEGREE PROJECT IN ELECTRICAL ENGINEERING. KTH Royal Institute of Technology. Vedoucí práce Christian Fleischer.

- [10] BARAI, Anup, Kotub UDDIN, W. D. WIDANAGE, Andrew MCGORDON a Paul JENNINGS. A study of the influence of measurement timescale on internal resistance characterisation methodologies for lithium-ion cells. *Scientific Reports* [online]. 2018, 8(1) [cit. 2023-05-23]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-017-18424-5
- [11] RATNAKUMAR, B.V., M.C. SMART, L.D. WHITCANACK a R.C. EWELL. The impedance characteristics of Mars Exploration Rover Li-ion batteries. *Journal of Power Sources* [online]. 2006, 159(2), 1428-1439 [cit. 2023-05-23]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2005.11.085
- [12] LIU, Yiqun, Y. Gene LIAO a Ming-Chia LAI. Effects of Depth-of-Discharge, Ambient Temperature, and Aging on the Internal Resistance of Lithium-Ion Battery Cell. *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)* [online]. IEEE, 2021, 2021-12-9, 1-5 [cit. 2023-05-23]. ISBN 978-1-6654-4231-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICECET52533.2021.9698495
- [13] FARMANN, Alexander, Wladislaw WAAG, Andrea MARONGIU a Dirk Uwe SAUER. Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources* [online]. 2015, 281, 114-130 [cit. 2023-05-23]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2015.01.129
- [14] *PowerStream: Introduction of INR18650-25R* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>
- [15] LI, Yi, Kailong LIU, Aoife M. FOLEY, Alana ZÜLKE, Maitane BERECIBAR, Elise NANINI-MAURY, Joeri VAN MIERLO a Harry E. HOSTER. Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, 113 [cit. 2023-05-23]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109254
- [16] Komplexní analýza roztoků elektrolytů lithium-iontových baterií pomocí plynové chromatografie a hmotnostní spektrometrie. *Pragolab* [online]. WebGet® - IT STUDIO, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.pragolab.cz/komplexni-analyza-roztoku-elektrolytu-lithium-iontovych-baterii-pomoci-plynove-chromatografie-a-hmotnostni-spektrometrie>



- [17] BUCHMANN, Isidor. BU-501a: Discharge Characteristics of Li-ion. *Battery University* [online]. Coalescent Design, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-501a-discharge-characteristics-of-li-ion>
- [18] YAO, Lei, Shiming XU, Aihua TANG, Fang ZHOU, Junjian HOU, Yanqiu XIAO a Zhijun FU. A Review of Lithium-Ion Battery State of Health Estimation and Prediction Methods. *World Electric Vehicle Journal* [online]. 2021, 12(3) [cit. 2023-05-23]. ISSN 2032-6653. Dostupné z: doi:10.3390/wevj12030113
- [19] BUCHMANN, Isidor. BU-409: Charging Lithium-ion. *Battery University* [online]. Coalescent Design, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>
- [20] ZOLLO, Bob. Measuring ACIR of Lithium-Ion Cells. *Electronic Design* [online]. Keysight Technologies, July 18, 2022 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/testmeasurement/article/21246713/keysight-technologies-measuring-acir-of-lithiumion-cells>
- [21] ZOLLO, Bob. Measuring DCIR of Lithium-Ion Cells. *Electronic Design* [online]. Keysight Technologies, April 15, 2020 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/testmeasurement/article/21128843/keysight-technologies-measuring-dcir-of-lithiumion-cells>
- [22] CHRISTENER, Joel. Jchristn/SuperSimpleTcp. *GitHub* [online]. Jul 5, 2019 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://github.com/jchristn/SuperSimpleTcp>
- [23] CHAMPION, John. ZedGraph. *GitHub* [online]. Jul 25, 2018 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://github.com/jchristn/SuperSimpleTcp>

## 7 Přílohy

K práci jsou přiložena schémata a náhledy výrobních podkladů testovacího zařízení a kusovník zařízení.

Příloha č. 1.: Schéma – propojení řídicí jednotky

Příloha č. 2.: Schéma – analogové vstupy a napájení řídicí jednotky

Příloha č. 3.: Schéma – MCU, ADC, výstupy, komunikace řídicí jednotky

Příloha č. 4.: Návrh DPS – všechny vrstvy

Příloha č. 5.: Návrh DPS – TOP & MIRR BOT

Příloha č. 6.: Osazení DPS – TOP & MIRR BOT

Příloha č. 7.: Kusovník komponent, list 1.

Příloha č. 8.: Kusovník komponent, list 2.

Součástí elektronické přílohy jsou tyto části.

1 – Testovací systém 3D modely

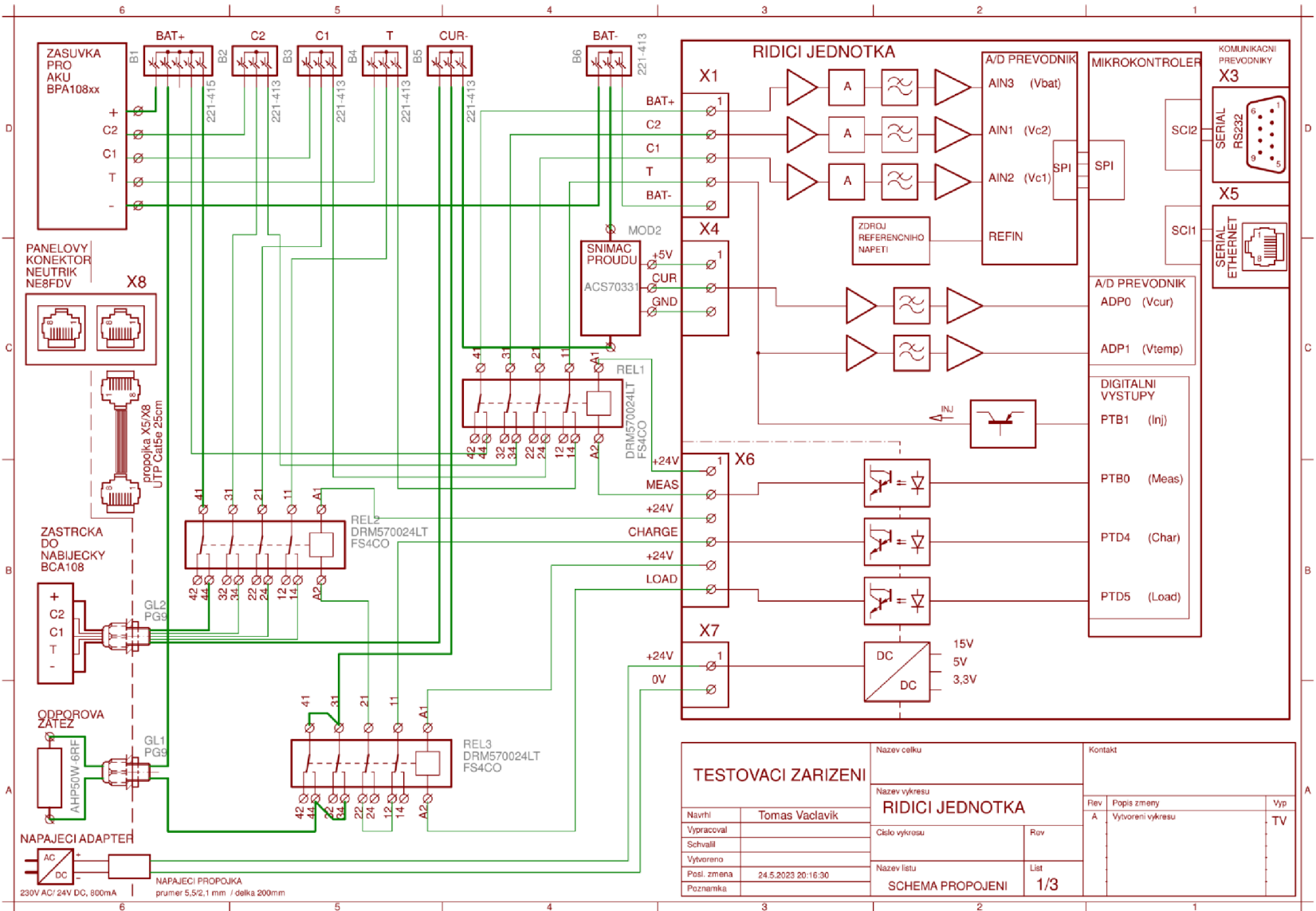
2 – Řídicí jednotka – katalogové listy

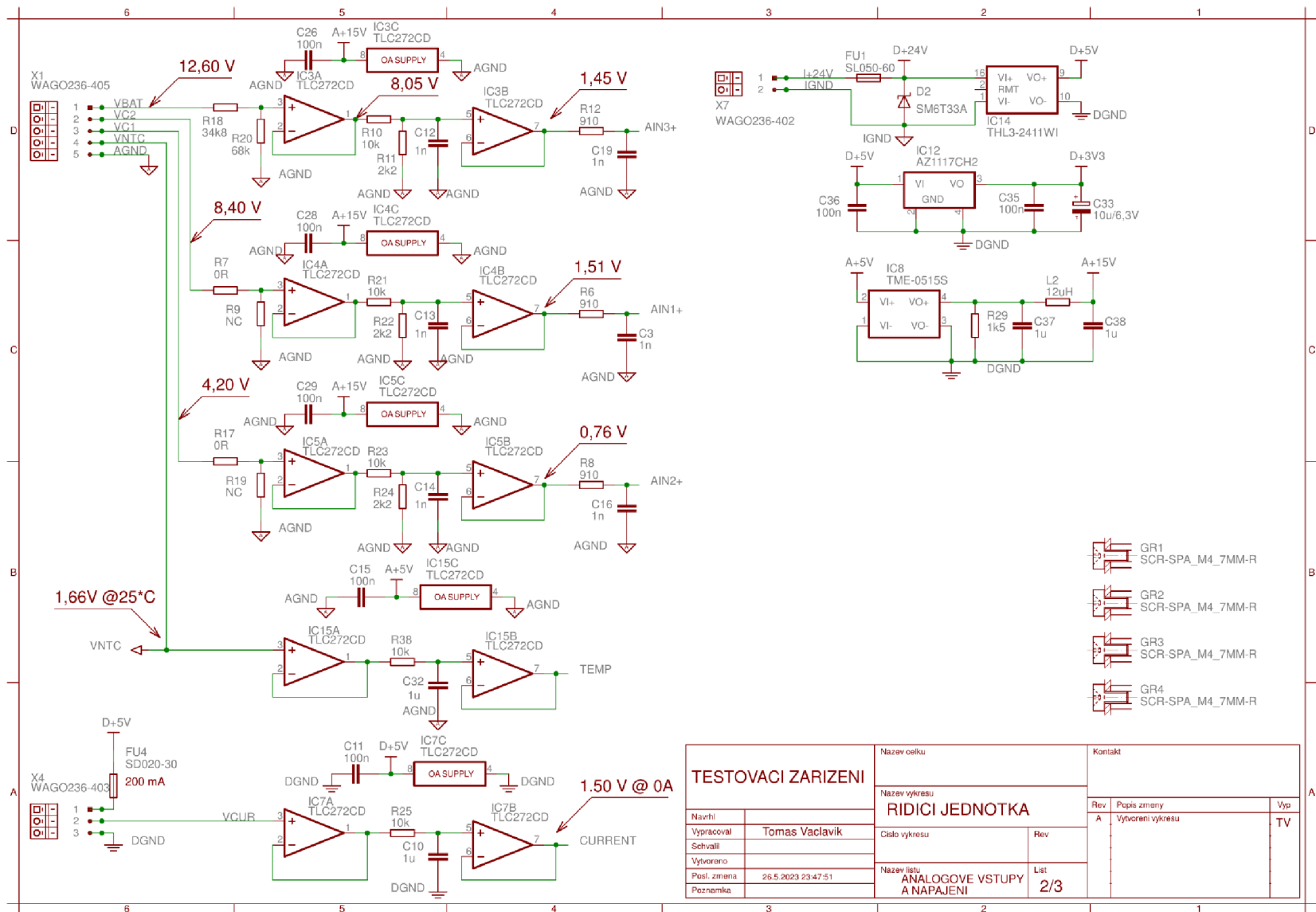
3 – Řídicí jednotka – návrh elektroniky

4 – Řídicí jednotka –software BTEST

5 – Testovací systém Aplikace

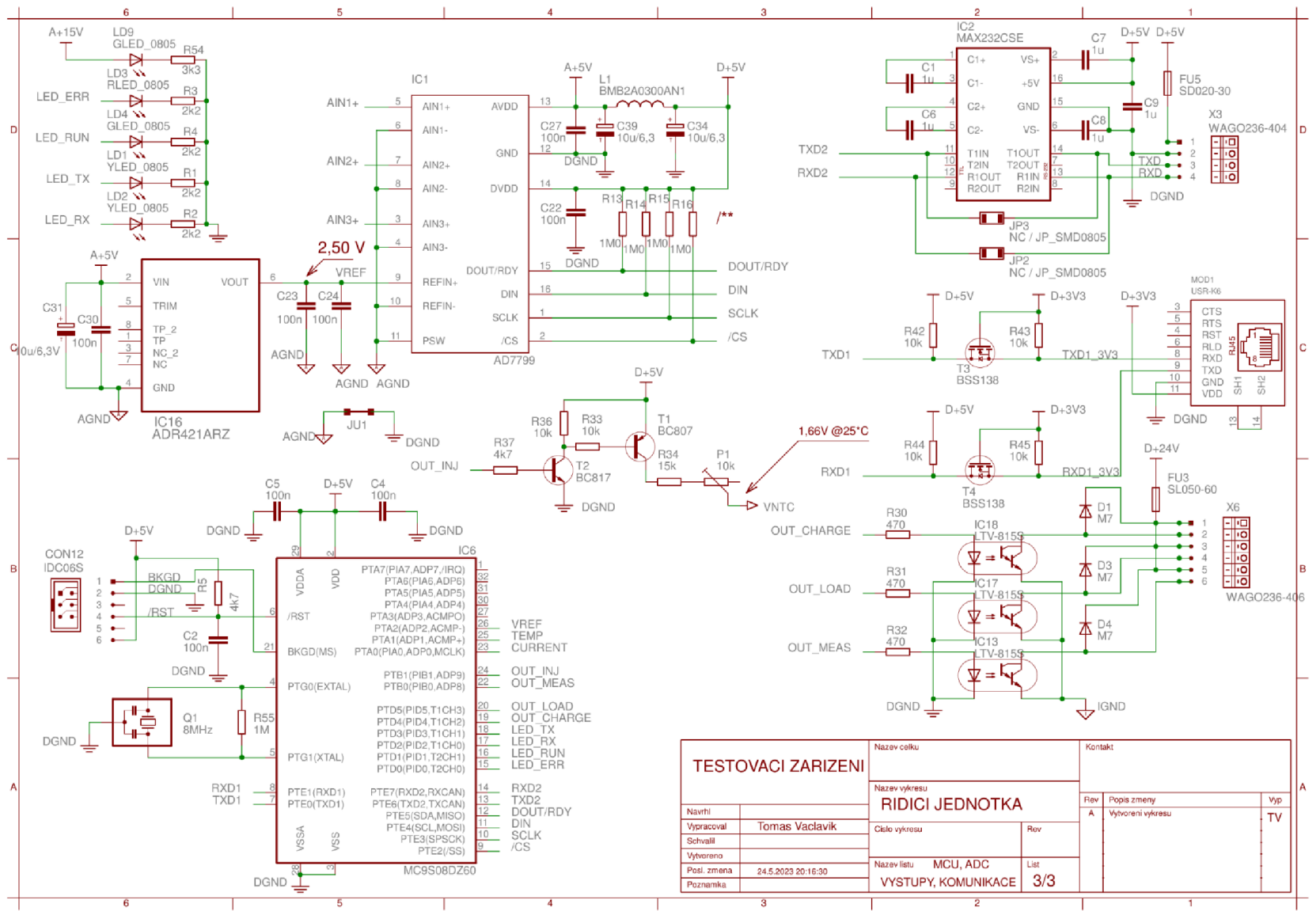
# Příloha č. 1: Schéma propojení řídicí jednotky





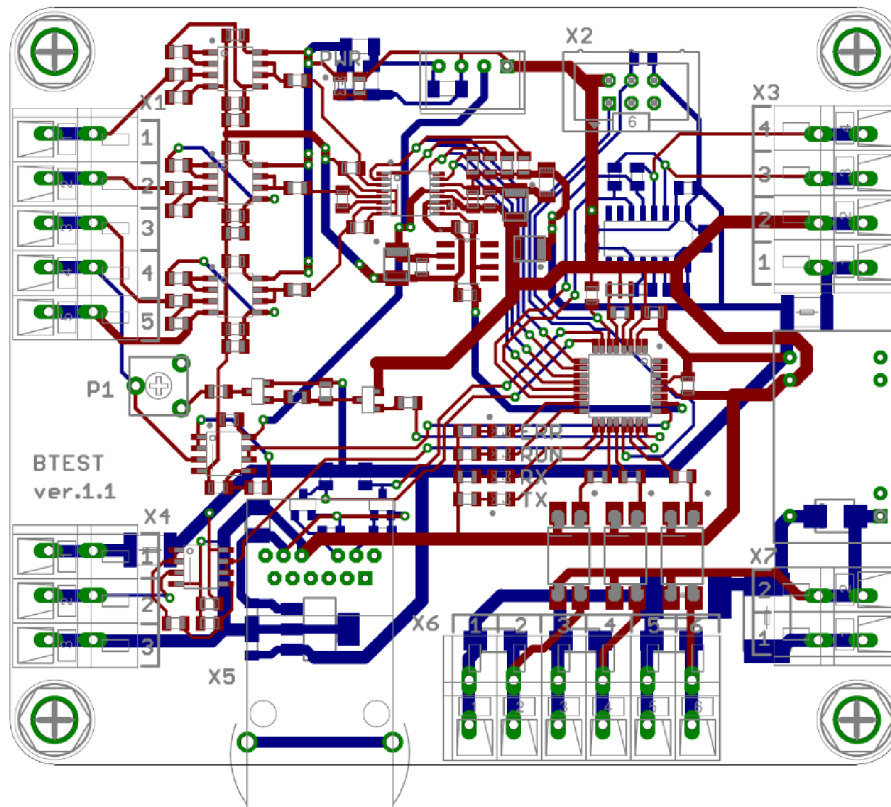
Příloha č. 2.: Analogové vstupy a napájení řídicí jednotky

Příloha č. 3.: MCU, ADC, výstupy, komunikace řídicí jednotky

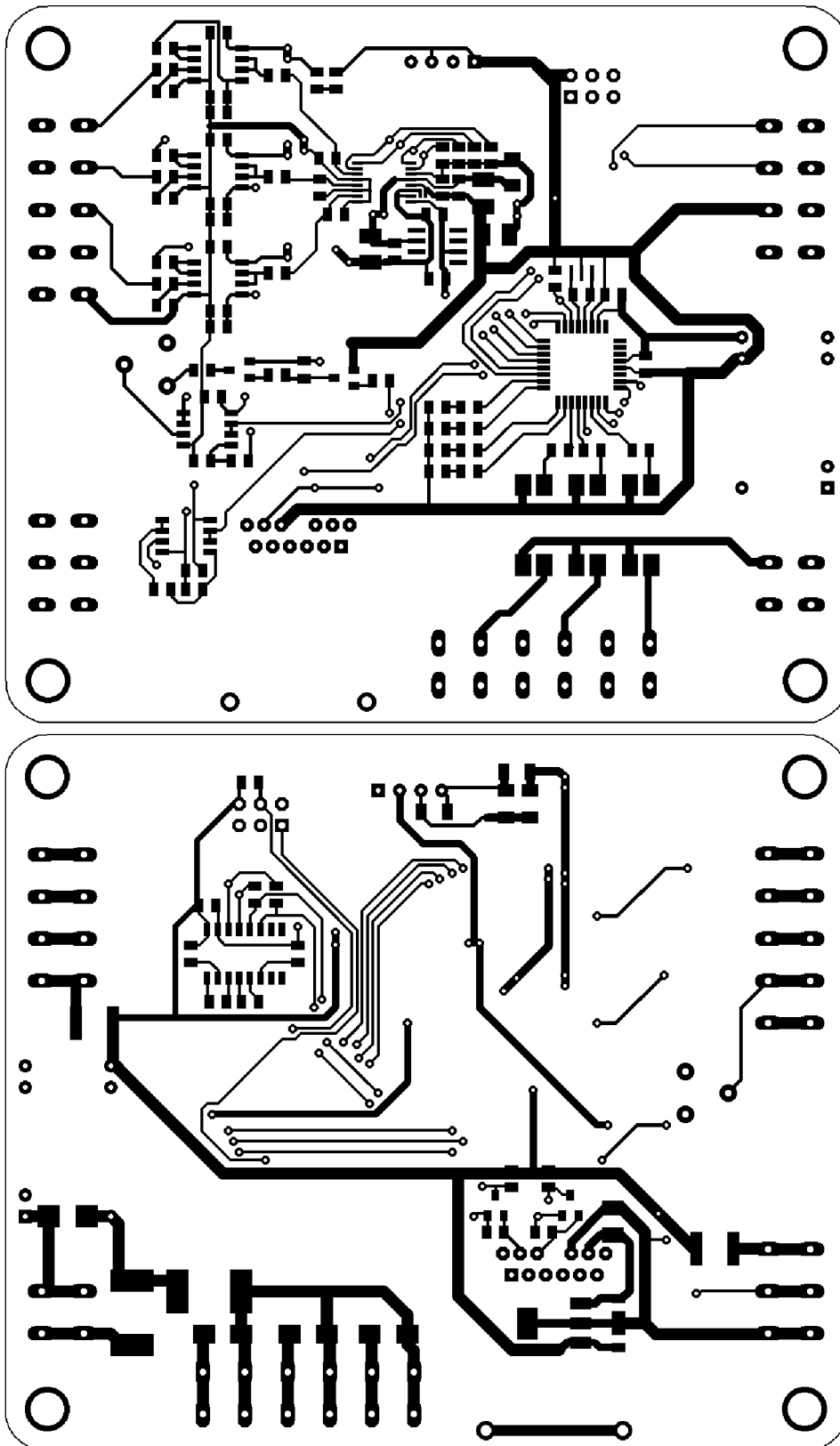


TESTOVACÍ ZARÍZENÍ		Název celku	Kontakt	
Navrh		Název výkresu	Rev	Popis změny
Vypracoval	Tomáš Vaclavík	<b>RÍDICÍ JEDNOTKA</b>	A	Vytvoření výkresu
Schválil		Číslo výkresu	Rev	
Vytvořeno		Název listu	MCU, ADC	List
Posl. změna	24.5.2023 20:16:30	VÝSTUPY, KOMUNIKACE	3/3	
Poznámka				

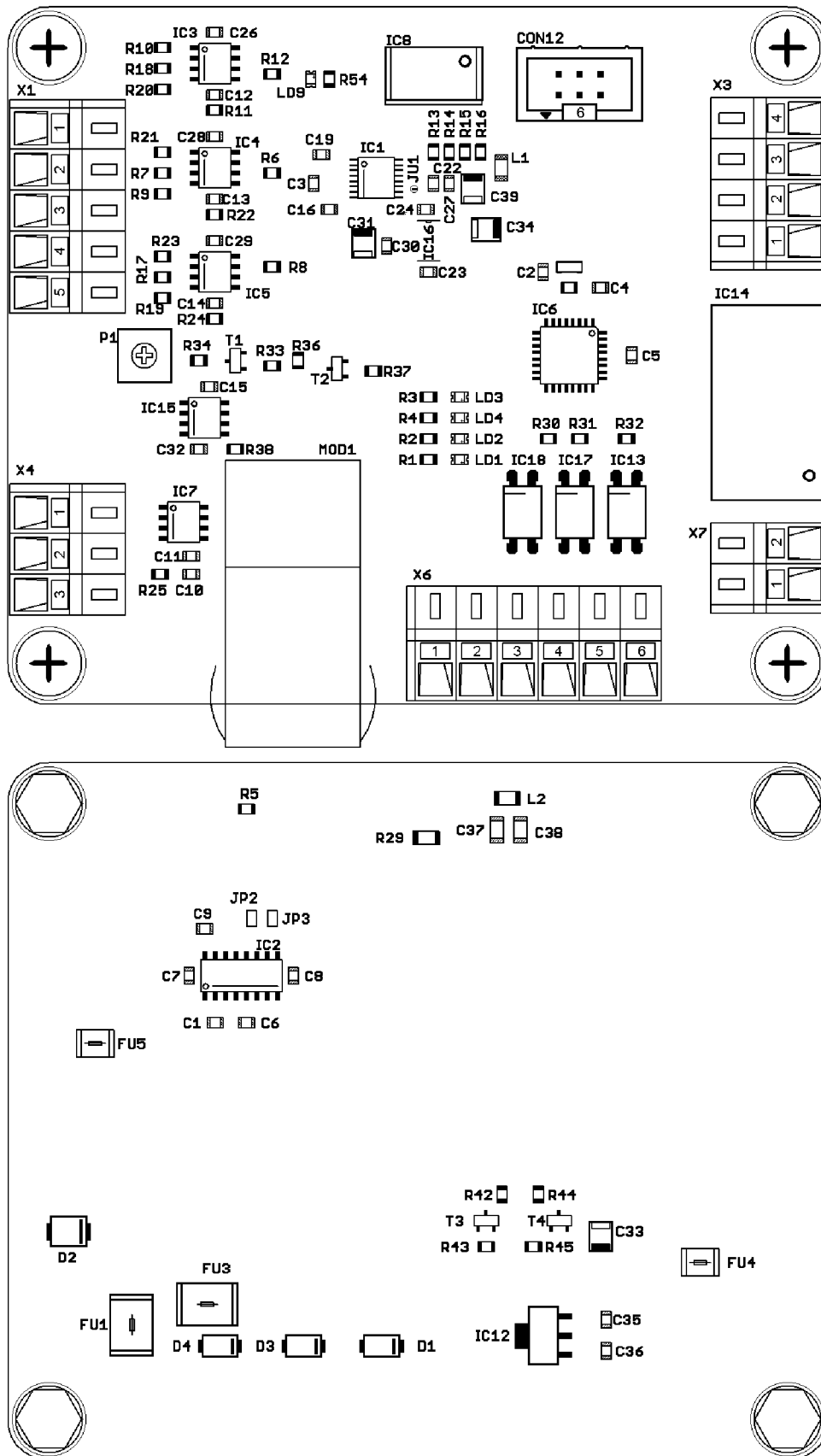
Příloha č. 4.: Návrh DPS – všechny vrstvy



Příloha č. 5.: Návrh DPS, TOP & MIRR BOT



Příloha č. 6.: Osazení DPS, TOP & MIRR BOT





## Příloha č. 7.: Kusovník, list 1.

## Seznam použitých součástí

Strana ½

Druh	Typ	Specifikace	Pouzdro	Výrobce	Ks	Cena /ks	Cena
R	CQ05S8F0000T5E	0R, 1%	R0805	ROYAL OHM	2	0,73	1,46
R	0805S8F4700T5E	470, 1%	R0805	ROYAL OHM	3	0,37	1,11
R	0805S8F9100T5E	910, 1%	R0805	ROYAL OHM	3	0,39	1,17
R	HP06W2F1501T5E	1k5, 1%	R1206	ROYAL OHM	1	1,25	1,25
R	0805S8F2201T5E	2k2, 1%	R0805	ROYAL OHM	7	0,37	2,59
R	0805S8F3301T5E	3k3, 1%	R0805	ROYAL OHM	1	0,39	0,39
R	0805S8F4701T5E	4k7, 1%	R0805	ROYAL OHM	2	0,43	0,86
R	0805S8F1002T5E	10k, 1%	R0805	ROYAL OHM	11	0,38	4,18
R	0805S8F1502T5E	15k, 1%	R0805	ROYAL OHM	1	0,39	0,39
R	0805S8F3482T5E	34k8, 1%	R0805	ROYAL OHM	1	0,39	0,39
R	0805S8F6802T5E	68k, 1%	R0805	ROYAL OHM	1	0,39	0,39
R	0805S8F1004T5E	1M0, 1%	R0805	ROYAL OHM	4	0,39	1,56
R	AHP50W-6RF	6R0, 1%, 50W		SR PASSIVES	1	52,56	52,56
POT	CA6V10K	potenciometr	THT	ACP	1	4,84	4,84
CK	VJ0805Y102KXACW1BC	1n	C0805	VISHAY	3	0,52	1,56
CK	VJ0805Y103KXACW1BC	10n	C0805	VISHAY	3	0,47	1,40
CK	VJ0805Y104KXACW1BC	100n	C0805	VISHAY	15	0,45	6,75
CK	VJ0805Y105KXATW1BC	1 $\mu$	C0805	VISHAY	7	4,35	30,45
CK	CL21A106KACL RNC	10 $\mu$	C0805	SAMSUNG	2	4,07	8,13
CT	TAJB106K006R	10 $\mu$ /6,3V	CTB	AVX	4	9,78	39,11
L	DL1206-12	12 $\mu$	L1206	Ferro Core	1	1,44	1,44
L	BMB2A0300AN1	Feritová perlička	L1206	SIGMA – TE	1	2,00	2,00
							0,00
D	M7	dioda	SMA	DC COMP	3	0,76	2,28
D	SM6T33A	dioda TVS	SMB	STM	1	3,80	3,80
LED	KP2012SYC	LED – žlutá	LD0805	KINGBRIGHT	2	4,26	8,52
LED	KP2012SURC	LED – červená	LD0805	KINGBRIGHT	1	4,41	4,41
LED	KP2012CGCK	LED – zelená	LD0805	KINGBRIGHT	2	4,36	8,72
FU	SL050-60	pojistka polymerová	FU2920	ECE	2	5,03	10,06
FU	SD020-30	pojistka polymerová	FU1812	ECE	2	2,28	4,56
T	BC807-40WT1G	PNP	SOT23/3	ONSEMI	1	1,01	1,01
T	BC817-40WT1G	NPN	SOT23/3	ONSEMI	1	0,98	0,98
T	BSS138LT1G	N-MOSFET	SOT23/3	ONSEMI	2	1,88	3,76
IC	TLC272CD	operační zesilovač	SOIC-8	TEXAS INSTR	5	30,67	153,35
IC	LTV815S-TA1	optočlen Darl.	GW4	LITEON	3	7,40	22,20
IC	MC9S08DZ60ACLC	mikrokontroler	LQFP-32	NXP	1	358,59	358,59
IC	AD7799	A/D převodník	TSSOP16	AnalogDevices	1	352,49	352,49
IC	ADR421ARZ	zdroj ref.napětí	SOIC-8	AnalogDevices	1	177,18	177,18
IC	MAX232CSE	převodník	SO16	Analog/MAXIM	1	99,17	99,17
IC	THL3-2411WI	spínaný zdroj	DIP	TRACOPOWER	1	495,37	495,37
IC	TME-0515S	spínaný zdroj	SIP	TRACOPOWER	1	132,31	132,31
IC	AZ1117CH2	stabilizátor na,LDO	SOT223	DiodesInc	1	4,05	4,05
IC	ACS70331	snímač proudu	SOIC-8	AllegroMicro	1	40,55	40,55

Příloha č. 8.: Kusovník, list 2.

Seznam použitých součástí

Strana 2/2

Druh	Typ	Specifikace	Pouzdro	Výrobce	Ks	Cena /ks	Cena
MOD	USR-K6	komunikační modul		USR IOT	1	326,00	326,00
MOD	EVKIT ACS712	modul převodníku		AllegroMicro	1	65,00	65,00
CON	T821106A1S100CEU	konektor IDC6		Amphenol	1	6,91	6,91
CON	236-402	svorkovnice, 2 pol		WAGO	1	11,89	11,89
CON	236-403	svorkovnice, 3 pol		WAGO	1	18,66	18,66
CON	236-404	svorkovnice, 4 pol		WAGO	1	24,87	24,87
CON	236-405	svorkovnice, 5 pol		WAGO	1	31,09	31,09
CON	236-406	svorkovnice, 6 pol		WAGO	1	37,31	37,31
CON	NE8FDPB	zásuvka, spojka RJ45		NEUTRIK	1	365,29	365,29
CON	221-413	pružinová svorka		WAGO	5	14,14	70,68
CON	221-415	pružinová svorka		WAGO	1	22,69	22,69
CON	221-500	držák svorek		WAGO	2	23,37	46,74
CAB	UL-CSA-HAR-22WH 2DU	kab. spojka 0,5mm2		LAPP+WAGO	24	9,80	235,20
CAB	UL-CSA-HAR-18WH 2DU	kab. spojka 1mm2		LAPP+WAGO	10	14,00	140,00
CAB	SPUTP002	UTP kab.Cat5e,25cm		PremiumCord	1	9,40	9,40
PCB	BTEST V1.0	deska plošných spojů			1	800,00	800,00
MEC	DIN 35x7,5x230	DIN lišta TS35, 23cm			1	92,42	92,42
MEC	PG9	průchodka		LAPP	2	7,47	14,94
MEC	686.208	krabice		SCAME	1	233,55	233,55
MEC	01.001.5553.0	WEB1001 – bočnice		Wieland	2	26,72	53,44
MEC	01.001.5753.0	WEB1001 – lamela 44,8		Wieland	2	44,63	89,26
MEC	WEB1001	Nosič DPS – držák DIN		Wieland	1	35,00	35,00
						Celkem Kč bez DPH	4 777,67
						Celkem Kč s DPH	5 780,98