



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVISTĚ PRO ANALÝZU BATERIÍ

DESIGN OF AN EXPERIMENTAL FACILITY FOR BATTERY ANALYSIS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Kvasnička

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Majzner, Ph.D.

BRNO 2024

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Karel Kvasnička

**ID:** 238474

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh experimentálního pracoviště pro analýzu baterií

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s běžnými typy bateriových článků, zaměřte se na postupy jejich nabíjení a vybíjení.
2. Navrhněte a sestavte experimentální pracoviště, které bude sloužit pro analýzu bateriových článků.
3. Cílem měření budou nabíjecí a vybíjecí charakteristiky s registrací dodaného a odebraného množství náboje v čase.
4. Naprogramujte aplikaci, která bude experimentální pracoviště řídit a ukládat naměřená data.
5. Pracoviště vybavte základním systémem pro ochranu baterií v případě selhání aplikace pro řízení.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ARENDÁŠ, Miroslav a RUČKA, Milan. Nabíječky a nabíjení. 2. aktualiz. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-860-5629-5
- [2] HUGGINS, Robert A. Energy storage: fundamentals, materials and applications. Second edition. Cham: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-21238-8

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 29.5.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Majzner, Ph.D.

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### 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**

Bakalářská práce se zabývá tvorbou experimentálního pracoviště pro analýzu baterií. Pro určení stavu baterie je nutné provést měření napětí a proudu při vybíjení a nabíjení, aby bylo možné zjistit kapacitu a celkovou kondici baterie. Parametry baterií se mění stářím nebo používáním. Existuje mnoho typů baterií, které se člení do dvou základních kategorií, na baterie primární a baterie sekundární. Jejich vlastnosti se různí v závislosti na použitých materiálech a výrobních postupech. Pro testování baterií bylo sestaveno experimentální pracoviště vybavené regulovatelným zdrojem, elektronickou zátěží, měřicí jednotkou a bezpečnostními prvky, které umožňují zkoušet různé typy baterií. Měření je automatizováno pomocí řídicího počítačového programu.

## **Klíčová slova**

Baterie, analýza baterií, testování baterií, vybíjení a nabíjení baterií

## **Abstract**

Assignment of bachelor's thesis is to create experimental workplace for analysis of batteries. To find out the condition and the capacity of a battery we have to discharge and charge the battery and measure the voltage and the current. Parameters of batteries are changing with aging and usage. There are many types of batteries that are divided into two main categories, primary batteries and secondary batteries. Their properties depend on used materials and production technique. An experimental workplace was built for battery testing equipped with a regulated power supply, a electronic load, a data acquisition unit and safety components. The workplace is able to test various types of batteries. Measurements are automated with computer program.

## **Keywords**

Batteries, analysis of batteries, testing of batteries, discharging and charging of batteries

## **Bibliografická citace**

KVASNIČKA, Karel. *Návrh experimentálního pracoviště pro analýzu baterií* . Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160520>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jiří Majzner.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Karel Kvasnička
<b>VUT ID studenta:</b>	238474
<b>Typ práce:</b>	Bakalářská práce
<b>Akademický rok:</b>	2023/24
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Návrh experimentálního pracoviště pro analýzu baterií

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 29. května 2024

-----  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Majznerovi, Ph.D. za pomoc a rady při řešení problémů v mé práci.

V Brně dne: 29. května 2024

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD .....	10
<b>1. BATERIE A JEJICH ROZDĚLENÍ.....</b>	<b>11</b>
1.1  OBECNÉ VLASTNOSTI A UVÁDĚNÉ PARAMETRY .....	11
1.2  ČLÁNKY PRIMÁRNÍ.....	13
1.2.1  Zinkové primární články .....	13
1.2.2  Lithiové primární články.....	14
1.3  ČLÁNKY SEKUNDÁRNÍ - AKUMULÁTORY.....	14
1.3.1  Lithiové akumulátory .....	15
1.3.2  NiCd a NiMH akumulátory .....	16
1.3.3  Kyselé olověné akumulátory .....	17
<b>2. EXPERIMENTÁLNÍ PRACOVÍŠTĚ.....</b>	<b>19</b>
2.1  PŘÍSTROJE POUŽITÉ K SESTAVENÍ PRACOVÍŠTĚ.....	19
2.1.1  Elektronická zátěž .....	19
2.1.2  Regulovatelný zdroj .....	20
2.1.3  Jednotka na získávání dat (DAU) .....	21
2.1.4  Ochranná relé.....	22
2.1.5  Adaptéry pro připojení baterie.....	23
2.1.6  Zapojení měřícího obvodu .....	25
2.2  OVLÁDÁNÍ A KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ.....	26
2.2.1  GPIB .....	26
2.2.2  Řídící program .....	27
<b>3. MĚŘENÍ PARAMETRŮ BATERIÍ.....</b>	<b>33</b>
3.1  NASTAVENÍ A OBSLUHA PRACOVÍŠTĚ PŘED, BĚHEM A PO MĚŘENÍ .....	33
3.1.1  Příprava pracoviště pro měření.....	33
3.1.2  Pozastavení měření v průběhu cyklování.....	33
3.1.3  Pokračování v měření po ukončení cyklování.....	34
3.1.4  Měření odporu baterie .....	34
3.2  VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	35
3.2.1  Měření kapacity alkalické baterie pro různé odebírané proudy .....	35
3.2.2  Porovnání kapacit dvou různých alkalických baterií.....	36
3.2.3  Měření nominální kapacity NiMH článku Nexcell 2000 mAh.....	37
3.2.4  Měření průběhů nabíjení 4čládkové lithium-iontové baterie .....	38
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>40</b>
LITERATURA.....	41
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	43
SEZNAM PŘÍLOH.....	44

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Náhradní schéma baterie (vytvořeno podle Fig. 9.12 ze zdroje [3]) .....	13
1.2	Lithium-iontové baterie a článěk (uprostřed) .....	16
1.3	NiMH baterie (vlevo) a NiCd článěk (vpravo).....	17
1.4	Olovené akumulátorové baterie.....	18
2.1	Experimentální pracoviště pro analýzu baterií .....	19
2.2	Ochranná relé .....	23
2.3	Vyrobené adaptéry pro připojení různých baterií k pracovišti .....	24
2.4	NiMH článěk s nabodovanými niklovými pásky připravený pro připojení k pracovišti .....	25
2.5	Schéma zapojení pracoviště .....	25
2.6	Nastavení cyklování a měření jednotlivých článků .....	27
2.7	Nastavení nabíjení .....	28
2.8	Nastavení vybíjení.....	28
2.9	Další nastavení .....	29
2.10	Měření vnitřního odporu baterie.....	30
2.11	Zobrazení aktuálních naměřených hodnot a ovládací tlačítka .....	30
2.12	Zobrazení aktuálních hodnot napětí na člancích .....	32
3.1	Příklad vlivu pozastavení a změny parametrů měření na průběhy napětí (vyznačeno zeleně).....	34
3.2	Průběhy napětí na alkalické baterii při vybíjení 100 a 200 mA.....	35
3.3	Průběh napětí dvou různých alkalických baterií při vybíjení 100 mA .....	36
3.4	Průběhy napětí při vybíjení NiMH článku Nexcell proudem 400 mA .....	37
3.5	Průběh celkového napětí a proudu při nabíjení 4článekové baterie .....	38
3.6	Průběh napětí na jednotlivých člancích při nabíjení 4článekové baterie.....	39
3.7	Průběh napětí na jednotlivých člancích při vybíjení 4článekové baterie .....	39

## SEZNAM TABULEK

2.1	Proudové omezení elektronické zátěže pro malé napětí [17] .....	20
2.2	Odchyly nastavení a měření elektronické zátěže [17] .....	20
2.3	Odchyly nastavení a měření regulovatelného zdroje [18] .....	21
2.4	Odchyly měření stejnosměrného napětí u jednotky 34970A [19] .....	21

# ÚVOD

V současné době existuje množství zařízení využívající baterie jako zdroj energie. Setkáváme se s celou řadou typů baterií, které mají v závislosti na použitých materiálech a výrobních postupech různé parametry. S každým typem baterií jsou spojené určité výhody a nevýhody. Pro účelné využití je potřeba vybrat nejvhodnější typ baterie.

Parametry baterií nejsou konstantní. Časem, cyklickým používáním a teplotním zatěžováním se některé parametry mění. Zjištění aktuálního stavu baterie se provádí měřením jednotlivých parametrů. Zásadní parametr, u kterého dochází ke změně, je kapacita baterie. Některé parametry, jako aktuální napětí, lze měřit na nezatížené baterii. Naopak parametry, jako je kapacita baterie, vnitřní odpor a změna napětí v průběhu vybíjení, se zjišťují řízeným zatěžováním dané baterie.

Práce má za úkol vytvořit experimentální pracoviště schopné automatizovaného měření parametrů baterií, které se mohou skládat z jednoho či více článků, při jejich cyklickém zatěžování podle nastavených parametrů. V průběhu zatěžování baterie musí být hlídány vypínací podmínky a teploty, aby nedošlo k poškození měřené baterie nebo pracoviště. Pracoviště vzniklo pro Ústav fyziky, za účelem vlastního ověřování parametrů baterií.

Kapitola 1. pojednává o používaných typech bateriových článků. Uvádí základní rozdělení, použité materiály a obecné parametry článků. Kapitola 2. se zabývá experimentálním pracovištěm. Jsou zde specifikovány přístroje s jejich parametry i účelem použití, popis systému pro zabezpečení měření i zapojení pracoviště. Rovněž seznamuje s počítačovým programem, kterým se měření na pracovišti nastavuje a ovládá. Vysvětluje jednotlivé ovládací prvky a funkce řídicího programu. Kapitola 3. se zabývá samotným měřením baterií. Popisuje postup obsluhy pracoviště před, během a po měření. Také se zde nachází výsledky měření.

# 1. BATERIE A JEJICH ROZDĚLENÍ

S množstvím dostupných bateriových technologií je potřeba pečlivě vybírat vhodné baterie pro daný účel. Baterie jako taková se skládá z jednoho či více článků a může obsahovat i zabudovanou elektroniku. Články se zapojují sériově či paralelně pro dosažení co největšího napětí nebo proudu. Článek se skládá z kladné a záporné elektrody, mezi nimiž je elektrolyt umožňující pohyb iontů. Elektrody jsou navzájem oddělené separátorem zaručujícím elektrickou izolaci, ale umožňující pohyb iontů. Elektrická energie je získávána chemickými procesy probíhajícími v článcích. Na kladné elektrodě probíhá redukční reakce a na záporné elektrodě reakce oxidační. [1][2]

## 1.1 Obecné vlastnosti a uváděné parametry

Jednotlivé typy článků lze členit podle použitých materiálů elektrod. Ty ovlivňují možnost jejich opětovného nabití, životnost, vybíjecí/nabíjecí charakteristiku, kapacitu a s ní spojenou hmotnost a velikost baterie, pracovní teploty i samovybíjení. Základní a nejdůležitější dělení článků je na primární články a akumulátory. Primární články nelze po spotřebování uložené energie znovu nabít a musí se vyměnit. U akumulátorů lze dobíjením opakovaně obnovovat uloženou energii.[2][3]

V průběhu vybíjení a nabíjení baterie se mění napětí na baterii. Tyto změny napětí se popisují pomocí vybíjecí a nabíjecí charakteristiky, jež udává závislost napětí na množství odebraného či dodaného náboje, které určují stav nabití baterie.[1][3] Stav nabití baterie se vyjadřuje jako procento z maximální kapacity baterie [3]. Nabíjecí a vybíjecí charakteristiky jsou závislé na podmínkách, při kterých jsou baterie nabíjeny či vybíjeny. Hlavní je rychlost odběru/dodání náboje. [1][3]

Velikost napětí na baterii ovlivňuje výkon, který může baterie dodat zátěži [3]. S napětím na baterii souvisí také vnitřní odpor baterie, který je závislý na více faktorech a není stálý. U všech baterií dochází k samovybíjení, kdy se spotřebovává uložená energie jinak než průchodem přes elektrický obvod. [2]

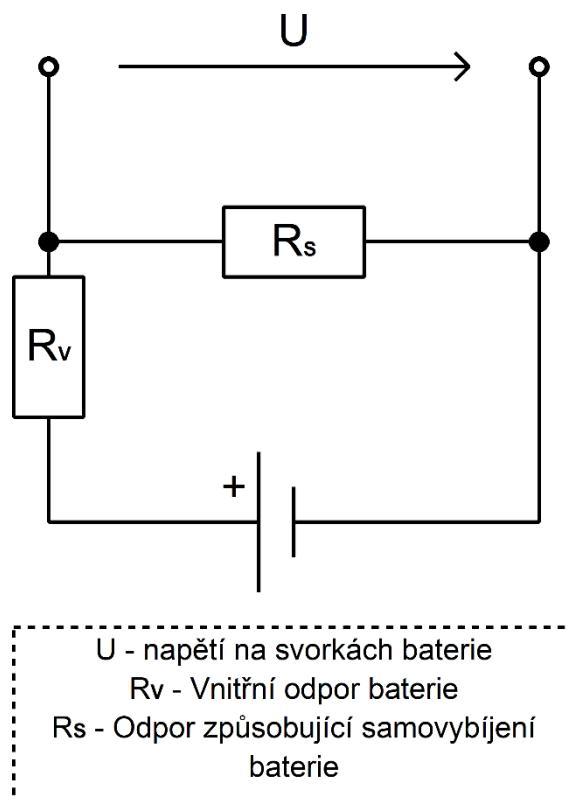
Pracovní teploty nám stanovují rozsah teplot, při kterých můžeme danou baterii používat. Při nabíjení a vybíjení dochází vlivem průchozího náboje k ohřívání baterie. Při překročení pracovních teplot může dojít k poškození nebo trvalému zničení baterie. [2]

Důležitá hodnota uváděná na každém článku je velikost jmenovitého napětí. Jmenovité napětí je zaokrouhlená střední hodnota napětí při vybíjení článku [1].

Kapacita a nabíjecí/vybíjecí proud se uvádí především u akumulátorových baterií a článků. Jsou závislé na použitých materiálech i výrobních postupech. Se stářím článků se mohou měnit. Kapacita baterie udává množství náboje, jež je baterie schopna při určitém vybíjecím proudu dodat do zátěže.[2] Kapacita baterie je na rozdíl od napětí závislá na množství materiálu, ze kterého jsou vyrobeny elektrody. Pomocí integrace

kapacity baterie podle napětí lze vypočítat energii uloženou v baterii. [3] U akumulátorových baterií se udává jmenovitá kapacita, která se stanoví měřením při daných podmínkách stanovených příslušnou normou.[2] Tato kapacita se značí pomocí  $C_n$  (Ah), kde  $n$  (h) představuje dobu vybíjení, pro kterou je daná kapacita deklarována [2][4]. Například u olověných akumulátorů pro všeobecné použití regulovaných ventilem, se jmenovitá kapacita měří při vybíjení takovým proudem, aby po 20-ti hodinovém vybíjení bylo na článcích napětí 1,75 V [5]. U primárních článků se oproti akumulátorům udávají kapacity vztažené pouze na vybíjecí proudy dané výrobcem.[2] U všech baterií se udává maximální proud, kterým lze danou baterii zatížit/nabíjet. Pouze u akumulátorové baterie obsahující alkalický a jiný nekyselý elektrolyt se hodnota nabíjecího a vybíjecího proudu udává jako násobek referenčního zkušební proudu  $I_r$  (A), který je číselně roven kapacitě  $C_n$  [4].

Vnitřní odpor baterie, uváděný jako zdánlivý vnitřní odpor baterie, se zjišťuje pomocí podílu změny napětí na změně proudu nebo měřením impedance pro průchod střídavého proudu většinou o frekvenci 1 kHz [1][2][6]. Vnitřní odpor baterie se skládá z odporu čistě elektrického a odporu způsobeného iontovou vodivostí baterie [3][6]. Elektrický odpor je způsobený elektrickým odporem materiálů použitých v baterii. Iontová vodivost je ovlivněna iontovou vodivostí elektrolytu, pohyblivostí iontů a povrchem elektrod. Elektrická vodivost se při zatížení baterie projeví okamžitě. Iontová vodivost má vliv na vnitřní odpor baterie až po několika milisekundách. V měření impedance pro průchod střídavého proudu o frekvenci 1 kHz se nemusí plně projevit vliv iontové vodivosti. Vnitřní odpor baterie s plným vlivem iontové vodivosti lze vypočítat pomocí podílu změny napětí baterie na změně odebíraného proudu. Odpor vypočítaný z podílu změny napětí na změně proudu je většinou vyšší jak impedance měřená při 1 kHz.[6] Změna hodnoty vnitřního odporu je závislá podobně jako kapacita na použitých materiálech, teplotě, stáří, ale i na stavu nabití. Nízké teploty snižují iontovou vodivost. Vnitřní odpor se může zvyšovat i snižovat a jeho změna nebo hodnota není stálá. Hodnota vnitřního odporu se udává spíše orientačně. Různé metody měření vnitřního odporu přinesou odlišné výsledky. [2][6]



Obrázek 1.1 Náhradní schéma baterie (vytvoreno podle Fig. 9.12 ze zdroje [3])

Obrázek 1.1 znázorňuje jednoduché náhradní schéma baterie, na základě něhož lze pozorovat vliv vnitřního odporu  $R_v$  a odporu způsobujícího samovybitení  $R_s$  na výstupní napětí baterie.

## 1.2 Články primární

Jedná se o články, v nichž probíhají při vybíjení nevratné chemické procesy. Ačkoliv je nevratnost chemických procesů nepříjemným problémem, stále se tyto články využívají vzhledem k jejich poměrně nízké ceně a vysoké hustotě energie. Materiály, které se nespotřebovali chemickými procesy, lze získat zpět recyklací. [3] Primární články se využívají především u zařízení, ve kterých se díky ceně, obtížnému přístupu nebo nízké spotřebě energie nevyplatí využít nabíjecí články. To mohou být hračky, dálkové ovladače, hodinky, kardiostimulátory. Nejvyužívanějšími primárními články jsou články zinkové a lithiové.

### 1.2.1 Zinkové primární články

Zinkové primární články obsahují v záporné elektrodě kovový zinek. U kladné elektrody a elektrolytu se používá více kombinací materiálů, které tvoří články s různými vlastnostmi. Na kladnou elektrodu se používá oxid mangančitý ( $MnO_2$ ), vzdušný kyslík ( $O_2$ ) nebo oxid stříbrný ( $Ag_2O$ ). [2][3]

Oxid mangančitý je nejčastěji používaným materiálem kladné elektrody a slouží k tvorbě velmi používaných alkalických článků a zinkochloridových článků (zinkouhlíkových). Rozdíl mezi alkalickými a zinkochloridovými články je tvořen použitým elektrolytem a vnitřním uspořádáním [2].

Alkalický článek má elektrolyt tvořený hydroxidem draselným (KOH). Napětí naprázdno nového článku se pohybuje mezi 1,5-1,6 V. [3]. Energetická hustota alkalické baterie dosahuje až 200 Wh/kg [7]. Zinkochloridový článek má mírně kyselý elektrolyt z chloridu zinečnatého  $ZnCl_2$ . Napětí naprázdno nového článku je 1,5 V. [2] Energetická hustota je kolem 40 Wh/kg [8]. Články obsahující oxid mangančitý se běžně používají do poklesu napětí na 1,2 až 0,8 V [2][3].

### 1.2.2 Lithiové primární články

Lithiové primární články využívají jako zápornou elektrodu kovové lithium. Pro kladnou elektrodu se využívá celá řada materiálů jako pyrit ( $FeS_2$ ), oxid mangančitý ( $MnO_2$ ), jód ( $I_2$ ) a další. Nejvíce používaným materiálem je oxid mangančitý. [3][7] Jako elektrolyt se používají soli obsahující lithium [3]. Nominální hodnoty napětí se pohybují od 1,5 do 4 V. Běžně se energetická hustota lithiových primárních článků pohybuje od 280 do 300 Wh/kg. Primární články využívající v kladné elektrodě thionyl chlorid ( $SOCl_2$ ) mají energetickou hustotu až 500 Wh/kg a poměrně dlouhou dobou skladovatelnosti. [7]

V porovnání s alkalickými články mají primární lithiové baterie větší energetickou hustotu, menší vnitřní odpor a větší rozsah nominálních napětí. Avšak díky využívání kovového lithia hrozí riziko požáru. [7]

## 1.3 Články sekundární - Akumulátory

Akumulátory jsou články schopné uchovat energii v chemických vazbách, které se dají jednoduše obnovit nabíjením. Nabíjení spočívá v reverzaci chemických procesů, vyvolaných spotřebováváním energie z akumulátoru, dodáním elektrického náboje vhodným zdrojem elektrické energie. [1]

Akumulátory se využívají v zařízeních s výskytem značné a opakované spotřeby energie. Schopnost nabíjení umožňuje v zařízeních ukládat i zpětné toky energie. Kromě toho umožňují využívat zařízení bez nutnosti časté a úplné výměny baterií. Akumulátory mají značné využití v přenosných zařízeních (mobilní telefony, notebooky), v dopravě (startovací akumulátory, elektrokola) a pro ukládání energie (fotovoltaické elektrárny, záložní zdroje).

Pro nabíjení akumulátorů lze využít zdrojů konstantního napětí, konstantního proudu, zdrojů s  $W$  charakteristikou, zdrojů nesymetrického střídavého proudu a jejich kombinací [1]. Postupy nabíjení jsou uváděny v technické dokumentaci pro daný akumulátor. Mezi nejvyžívanější akumulátory patří akumulátory lithiové, NiMH a kyselé olovené.

### 1.3.1 Lithiové akumulátory

Tyto akumulátory mají v záporné elektrodě lithium. Lithium lze využít ve více formách, v čisté kovové, ve slitině s dalšími prvky a jako iont zachycený v uhlíkové mřížce. Použití čistého kovového lithia přináší rizika spojená s velkou reaktivitou, spolu s potížemi během nabíjení se zpětným ukládáním kovu nerovnoměrně na elektrodě nebo mimo elektrodu. Slitiny lithia s dalšími prvky mají potíže se změnami objemu elektrody během procesu nabíjení a vybíjení baterie. Lithium v uhlíkové mřížce má nižší energetickou hustotu než čisté kovové lithium nebo jeho slitiny. [3][9]

Nejvíce používané je lithium v uhlíkové mřížce i vzhledem k vyšší bezpečnosti, ačkoliv je značně snížena energetická hustota. Tyto články se díky ukládání iontů lithia v uhlíkové mřížce nazývají lithium-iontové. Jako materiál kladné elektrody se používají soli kyslíkatých kyselin obsahující lithium jako kobaltitan litný ( $\text{LiCoO}_2$ ), manganistan litný ( $\text{LiMnO}_4$ ) a fosforečnan litno-železnatý ( $\text{LiFePO}_4$ ). Často využívaným elektrolytem je hexafluorid litno-fosforečný ( $\text{LiPF}_6$ ) rozpuštěný v organickém rozpouštědle. [3] [9] [10]

Nominální napětí většiny článku je kolem 3,6 V. Může se však pohybovat od 1,5 do 3,75V. [2] Běžné lithium-iontové články mají energetickou hustotu od 50 do 260 Wh/kg [10]. Existující experimentální lithium-iontové baterie přesahují energetickou hustotou 700 Wh/kg [11].

Všechny lithium-iontové baterie vyžadují monitorovací systém, který baterii chrání před snadným poškozením v důsledku přebíjení, přílišným vybitím nebo překročením dovolených teplot baterie. U vícečládkových baterií se v důsledku rozdílné kapacity a rychlosti samovybíjení mohou objevit rozdíly ve stavu nabití jednotlivých článků. Při rozdílném stavu nabití se můžou jednotlivé články přetěžovat a zničit. Taky se snižuje celková využitelná kapacita baterie. Rovnoměrné nabíjení a vybíjení jednotlivých článků zajišťuje balanční systém. Monitorovací i balanční systém musí být přizpůsobený danému typu baterie. Podle počtu článků a celkové komplexity baterie můžou být tyto ochranné systémy různě složité. [9]

K nabíjení lithiových akumulátorů se využívá kombinace zdrojů konstantního proudu a konstantního napětí. Nejprve se články nabíjí nastaveným konstantním proudem do stanovené hodnoty napětí a pak se udržuje konstantní napětí. Nabíjení je ukončeno po zvoleném čase nebo po poklesu nabíjecího proudu na stanovenou hodnotu. Hodnoty nabíjecího proudu pro pomalé nabíjení běžných článků jsou do 1,5násobku proudu  $I_c$ . Hodnoty vybíjecího proudu jsou často do 2násobku  $I_c$ . Konečné nabíjecí i vybíjecí napětí se pro různé akumulátory liší v závislosti na druhu použitých materiálů. U článků se jmenovitým napětím okolo 3,6 V se při nabíjení pohybuje maximální napětí od 4 do 4,5 V, minimální napětí při vybíjení se pohybuje od 2,5 do 3 V na článek. [2]

Příkladem lithium-iontového článku je UR18650F od firmy Panasonic. Jedná se o článek s nominálním napětím 3,7 V a kapacitou 2450 mAh. Hmotnost činí 48 g. Vybíjecí proud může být až 4900 mA ( $2I_c$ ) do napětí 2,5 V. Nabíjet lze článek kombinací

zdroje konstantního napětí a proudu, s omezením napětí na 4,2 V a maximem proudu 2450 mA ( $1I_t$ ). Vybíjení se ukončí po poklesu proudu na 50 mA. [12]

Obrázek 1.2 zobrazuje dva vícečláňkové lithium-iontové akumulátory a samostatný článek.



Obrázek 1.2 Lithium-iontové baterie a článek (uprostřed)

### 1.3.2 NiCd a NiMH akumulátory

Tyto akumulátory mají kladnou elektrodu vyrobenou z kovového niklu a jeho kyslíkatých sloučenin. NiCd článek má zápornou elektrodu vyrobenou z kovového kadmia. NiMH článek má zápornou elektrodu vyrobenou ze slitiny dvou kovů, které do svojí struktury zachytí vodík. Oba typy článku mají alkalický elektrolyt. [3]

Nominální napětí na článku u obou typů je 1,2 V. NiMH je nástupcem NiCd akumulátoru. Výhodou NiMH oproti NiCd článku je absence jedovatého kadmia a větší hustota energie. [3] Běžná energetická hustota NiCd článku je 45 až 80 Wh/kg a u NiMH článku 60-120 Wh/kg [10].

Nabíjení NiCd a NiMH článků se provádí normálním nebo konzervačním proudem. Nabíjení normálním proudem probíhá většinou proudem  $0,1-0,3I_t$ . Konec nabíjení je určen poklesem napětí na článku, časem nebo sledováním teploty článku. Nabíjení konzervačním proudem spočívá v nepřetržitém dodávání malého nabíjecího proudu. Vybíjecí proud může být v závislosti na typu i více jak  $7I_t$ . [1][2] Minimální napětí je 1 V [13].

Například NiMH článek BK110AAO od firmy Panasonic má nominální napětí 1,2 V. Nominální kapacita činí 1100 mAh. Váha je 24 g. Vybíjecí proud může být až 2200 mA ( $2I_t$ ) do napětí 1 V. Nabíjet článek lze pomalu proudem 110 mA po dobu 16 h nebo rychle proudem 1100 mA po dobu 1,2 h. [14]

Obrázek 1.3 zobrazuje NiMH baterii a NiCd článek.



Obrázek 1.3 NiMH baterie (vlevo) a NiCd článěk (vpravo)

### 1.3.3 Kyselé olověné akumulátory

Tento akumulátor má kladnou elektrodu obsahující oxid olovnatý ( $\text{PbO}_2$ ) a zápornou elektrodu obsahující kovové olovo. Jako elektrolyt se využívá kyselina sírová ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). [3]

Rozdíly v olověných akumulátorech jsou tvořeny především jejich konstrukcí. Olověné akumulátory dělíme do dvou velkých skupin, na otevřené a ventilem řízené (VRLA) akumulátory. U otevřených olověných akumulátorů je nevýhodou nutnost doplňování vody kvůli jejímu odpařování. Ventilem řízené akumulátory obsahují zahuštěný elektrolyt v podobě gelu nebo směsi se skelným vláknem (skelná vlákna slouží zároveň jako separátor) a jsou uzavřené. Díky tomu nemůže elektrolyt vytéct a není potřeba doplňovat vodu. Ventil je použit u ventilem řízeného akumulátoru z důvodu ochrany před přílišným nárůstem vnitřního tlaku, především při přebíjení. [2][3]

Nominální napětí na článku je 2 V [1]. Energetická hustota je 30-50 Wh/kg [10].

Pro nabíjení olověných akumulátorů lze využít více typů zdrojů. Hojně využívané jsou zdroje konstantního napětí. Při použití zdroje konstantního napětí se volí napětí v rozmezí 2,3-2,45 V na článek, s počátečním omezením maximální hodnoty proudu dané výrobcem.[1][15] Napětí se volí podle potřebné rychlosti nabíjení a podle použití baterie. Baterie, které se často cyklicky používají, se nabíjí vyšším napětím a proudem. Při občasném použití je doporučeno konstantní a pomalé nabíjení baterie nižším proudem i napětím.[15] Při nabíjení olověných akumulátorů dochází k nechtěnému rozkladu vody na vodík a kyslík [1]. Běžně se napětí nezatíženého článku pohybuje kolem 2,16 V [15]. Minimální napětí na nezatíženém článku je 1,94 V. Při vybíjení se v závislosti na velikosti odebíraného proudu může napětí pohybovat od 1,75 do 1,3 V na článek. [15]

Například startovací baterie Optima Redtop Model:8001-287, určená do automobilů, má nominální napětí 12 V. Jedná se o šestičláňkovou ventilem řízenou baterii

s elektrolytem zahuštěným skelnými vlákny. Celková hmotnost je 17,2 kg. Nominální kapacita činí 50 Ah. Vybíjecí proud při nízkých teplotách činí 815 A. Baterii lze běžně nabíjet zdrojem konstantního napětí v rozmezí 13,8 až 15 V s proudem maximálně 10 A po dobu 12 až 15 hodin. Samovybíjení lze kompenzovat neustálým nabíjením zdrojem napětí 13,2-13,8 V s omezením nabíjecího proudu na 1 A. Rychle nabíjet baterii lze zdrojem s napětím nejvýše 15,6 V bez omezení proudu, zastavit nabíjení je doporučeno při poklesu proudu pod 1 A. Baterie nesmí při rychlém nabíjení přesáhnout teplotu 50 °C. [16]

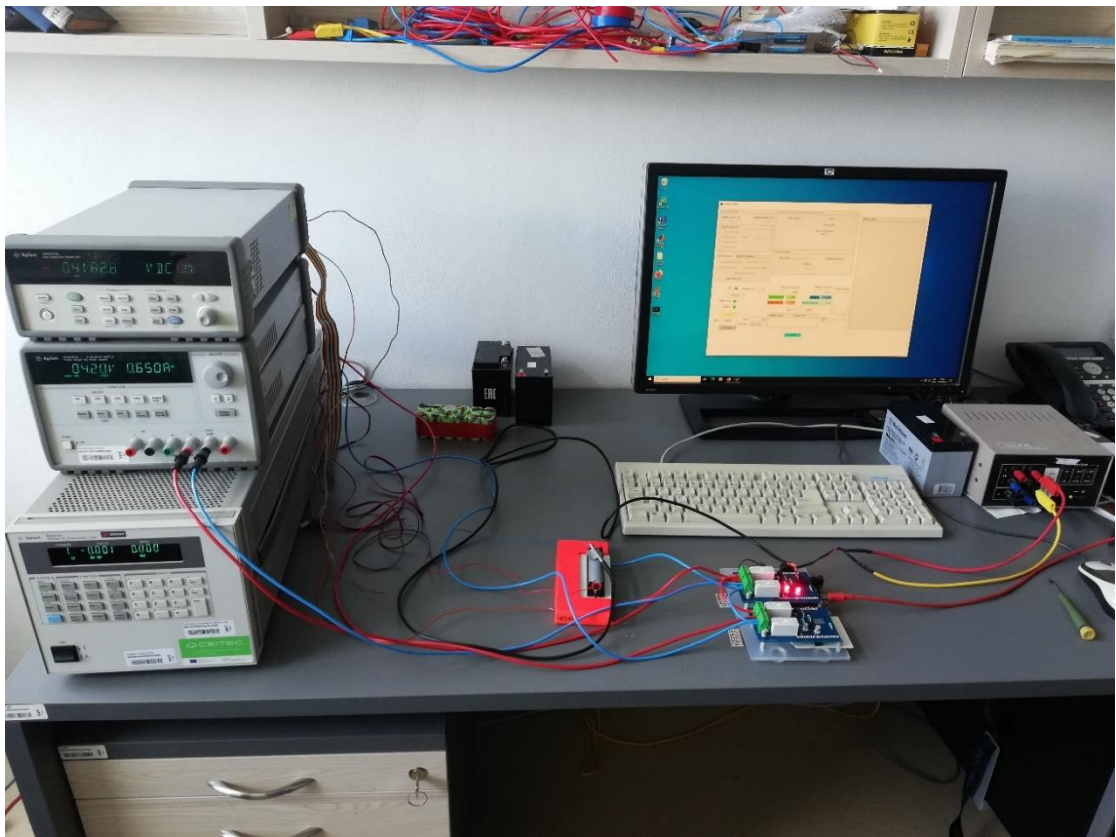
Obrázek 1.4 zobrazuje otevřenou olověnou baterii (nahore) a VRLA baterii (dole).



Obrázek 1.4 Olověné akumulátorové baterie

## 2. EXPERIMENTÁLNÍ PRACOVISTĚ

Pro pokusy a měření baterií muselo experimentální pracoviště splnit několik požadavků. Pracoviště bylo nutné vybavit regulovatelným zdrojem i zátěží, umožňujícími snadné nastavení požadovaných parametrů pro cyklování baterií, z přístrojů, které byly na Ústavu fyziky k dispozici. Pro snadné měření bylo nutné, aby pracoviště automaticky měřilo a ukládalo jak napětí celé baterie, tak i jednotlivých článků a odebíraného proudu v čase. Pracoviště muselo být také schopno samo přepínat mezi nabíjecí či vybíjecí částí cyklu, a to po nastavený počet cyklů. Pro bezpečné dlouhodobé měření bez dohledu muselo pracoviště dokázat vyhodnotit stav baterie a bylo-li třeba, automaticky zastavit měření. Experimentální pracoviště zobrazuje obrázek 2.1.



Obrázek 2.1 Experimentální pracoviště pro analýzu baterií

### 2.1 Přístroje použité k sestavení pracoviště

#### 2.1.1 Elektronická zátěž

Jako zátěž na vybíjení baterií jsem zvolil elektronickou zátěž Agilent N3301A (SN: MY52000270) s modulem N3302A. Zátěž je schopná odebrat výkon z baterie až 150 W. Rozsah napětí se pohybuje v rozmezí 0 až 60 V a proudu v rozmezí 0 až 30 A.

Maximální proud je omezen na 16 A kvůli proudovému omezení ochranných relé. U napětí nižšího jak 2 V se snižuje maximální možný odebíraný proud (viz tabulka 2.1). [17]

Tabulka 2.1 Proudové omezení elektronické zátěže pro malé napětí<sup>1</sup> [17]

Napětí (V)	2	1,5	1	0,5	0
Maximální proud (A)	30	22,5	15	7,5	0

Pro zatížení baterie lze použít režim konstantního odběru proudu, konstantního odporu nebo konstantního napětí. Experimentální pracoviště využívá pouze režim konstantního odporu a proudu. [17] V tabulce 2.2 jsou uvedeny odchylky měření a nastavení elektronické zátěže. Při kontrole elektronické zátěže byla zjištěna odchylka nastavení konstantního proudu kolem +6 mA k požadované hodnotě.

Tabulka 2.2 Odchylky nastavení a měření elektronické zátěže<sup>2</sup> [17]

Nastavení zatěžování konstantním proudem	rozsah	3 A	30 A
	odchylka	0,1 % + 5 mA	0,1 % + 10 mA
Měření proudu	rozsah	3 A	30 A
	odchylka	0,05 % + 3 mA	0,05 % + 6 mA
Měření napětí	rozsah	6 V	60 V
	odchylka	0,05 % + 3 mV	0,05 % + 8 mV

Režim konstantního odporu lze nastavit v rozmezí od 0,067 do 2000Ω [17].

Četnost vzorkování je ponechána na 1000 vzorcích za 20 ms [17].

Komunikace je zprostředkována pomocí GPIB portu (rozhraní IEEE 488).

Maximální proud je v řídicím programu omezen na 16 A z důvodu proudového omezení použitého ochranného relé. Maximální proud může být dále omezen i použitým adaptérem pro připojení baterie.

### 2.1.2 Regulovatelný zdroj

Na místo regulovatelného zdroje byl vybrán zdroj E3631A (SN: MY40030889) od firmy Agilent. Zdroj má tři regulovatelné výstupy. První výstup má napětí 0 až 6 V s odběrem proudu 0 až 5 A. Druhý výstup má napětí 0 až 25 V s odběrem proudu 0 až 1 A. Třetí výstup má napětí 0 až -25 V s odběrem proudu 0 až 1 A. Druhý a třetí výstup

<sup>1</sup> Za běžných podmínek lze odebírat 30 A i do napětí 1,2 V.

<sup>2</sup> ± (% z hodnoty + odchylka)

mají společnou svorku. Pro experimentální pracoviště je využit druhý výstup. Regulovatelný zdroj dokáže automaticky přepínat mezi režimem konstantního napětí a konstantního proudu. [18] Odchytky nastavení a měření jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3 Odchytky nastavení a měření regulovatelného zdroje<sup>3</sup> [18]

Výstup:	1.	2.	3.
Nastavení napětí	0,1 % + 5 mV	0,05 % + 20 mV	
Nastavení proudu	0,2 % + 10 mA	0,15 % + 4 mA	
Měření napětí	0,1 % + 5 mV	0,05 % + 10 mV	
Měření proudu	0,2 % + 10 mA	0,15 % + 4 mA	
Regulace zátěže	< 0,01 % + 2 mV < 0,01 % + 250 $\mu$ A		
Teplotní koeficient pro $^{\circ}$ C	0,01 % + 2 mV 0,02 % + 3 mA	0,01 % + 3 mV 0,02 % + 0,5 mA	

Komunikace je zprostředkována pomocí GPIB portu (rozhraní IEEE 488).

### 2.1.3 Jednotka na získávání dat (DAU)

Pro přesné měření celkového napětí a napětí na jednotlivých člancích vícečlánkových baterií jsem vybral jednotku na získávání dat (DAU) 34970A (SN: MY41014807) se dvěma měřicími moduly 34901A (SN: MY41102740 a MY41114123) od firmy Agilent. Oba moduly mají 20 kanálů schopných měřit teplotu a napětí do 300 V. Moduly disponují ještě dvěma samostatnými kanály na měření proudu do 1 A. Odpor pro měření napětí je 10 M $\Omega$   $\pm$ 1 %. [19] Rozlišení měřených hodnot je nastaveno na 5<sup>1/2</sup> digitů pro rychlejší měření. Nepřesnosti měření jsou uvedené v tabulce 2.4.

Tabulka 2.4 Odchytky měření stejnosměrného napětí u jednotky 34970A<sup>4</sup> [19]

Rozsah	Odchytky po 1 roce při 23 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C	Teplotní koeficient 0-18 $^{\circ}$ C, 28-55 $^{\circ}$ C
100 mV	$\pm$ (0,0050 % + 0,0040 %)	$\pm$ (0,0005 % + 0,0005 %)
1 V	$\pm$ (0,0040 % + 0,0007 %)	$\pm$ (0,0005 % + 0,0001 %)
10 V	$\pm$ (0,0035 % + 0,0005 %)	$\pm$ (0,0005 % + 0,0001 %)
100 V	$\pm$ (0,0045 % + 0,0006 %)	$\pm$ (0,0005 % + 0,0001 %)
300 V	$\pm$ (0,0045 % + 0,0030 %)	$\pm$ (0,0005 % + 0,0003 %)

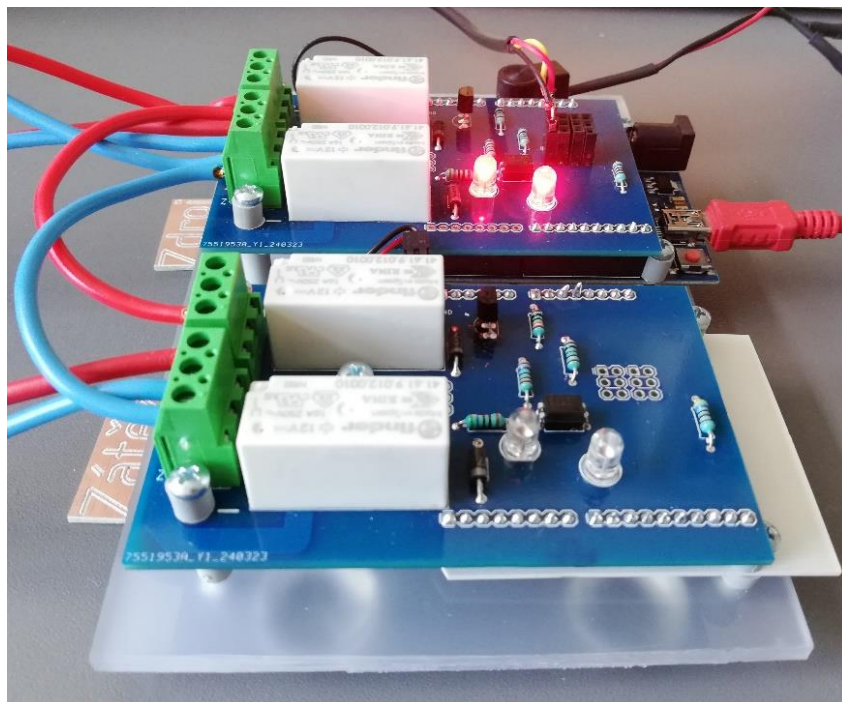
<sup>3</sup> Hodnoty nepřesností platí až po 1 hodině od spuštění regulovatelného zdroje 12 měsíců od kalibrace při 25  $^{\circ}$ C  $\pm$  5  $^{\circ}$ C.  $\pm$  (% z hodnoty + odchytky)

<sup>4</sup> Platí po 1 hodině provozu s rozlišením 6<sup>1/2</sup> digitů a pomalým AC filtrem.  $\pm$  (% z hodnoty + % z rozsahu)

První modul je určen pro měření jednotlivých napětí na vícečláňkových bateriích a celkového napětí na baterii. Je možné měřit najednou až 18 článků zapojených do série. Pro měření napětí na baterii je vyhrazen jeden kanál. Měření napětí na baterii slouží pro získání přesné hodnoty napětí baterie, které nelze získat z měření napětí elektronickou zátěží a regulovatelným zdrojem. Vývody pro měření napětí na baterii a napětí na jednotlivých člancích jsou pro připojení opatřeny konektory. Druhý modul slouží k měření teploty. Pro měření teploty jsou vyhrazeny dva kanály, každý s vlastním termočláňkem. Měření teploty slouží ke zjištění teploty samotné baterie a teploty okolí. Pro účely měření není nutné DAU jednotku zapojit. Při nezapojení ovšem nelze použít funkce, které jsou na měřeních z této jednotky závislé. Možnost měřit proud pomocí této jednotky jsem nevyužil z důvodu nízkého maximálního měřitelného proudu 1 A, jelikož proudy, které mohou být odebírané, přesahují tuto hodnotu.

#### **2.1.4 Ochranná relé**

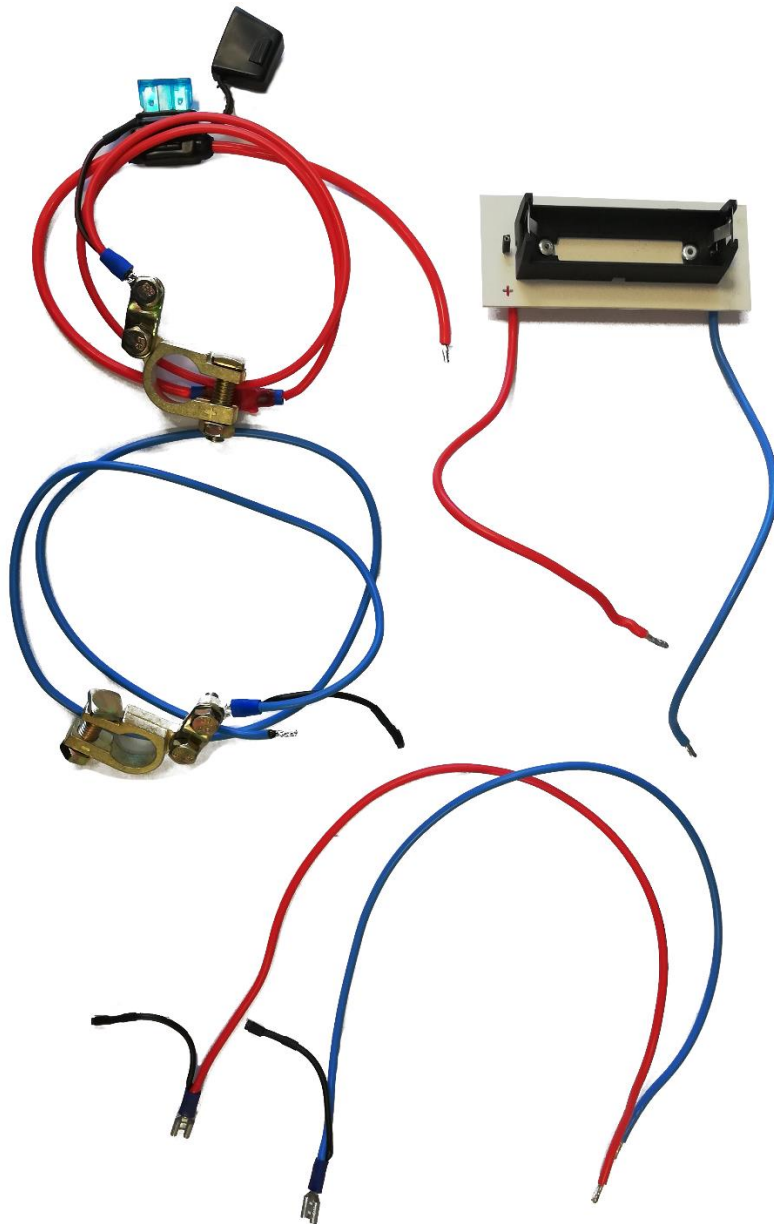
Ochranná relé (obrázek 2.2) jsem vytvořil a přidal do obvodu z důvodu bezpečnosti měření. Při ztrátě napájení nebo při chybě řídicího počítačového programu by mohlo dojít k neřízenému cyklování baterie. Kromě ochrany baterie mají relé za úkol chránit elektronickou zátěž a regulovatelný zdroj a připojit pouze přístroj potřebný pro danou fázi cyklu. Kladný a záporný pól má své vlastní relé k úplnému odpojení obvodu. Elektronickou zátěž a regulovatelný zdroj lze nezávisle odpojit a připojit, aby nezpůsobovaly dodatečné nepřesnosti v měření. Relé má proudové omezení 16 A při 30 V stejnosměrných. Řízení relé má na starost programovatelný mikrokontrolér Arduino UNO. Arduino UNO má naprogramovaný časovač WATCHDOG, který po uplynutí určené doby bez komunikace odpojí relé. Arduino UNO je také vybaveno teploměrem, který při dosažení 42 °C taktéž baterii pomocí relé odpojí. Teplota, při které relé baterii odpojí, lze změnit pouze přeprogramováním mikrokontroléru. Komunikace je zprostředkována s počítačem prostřednictvím USB a s řídicím programem komunikuje prostřednictvím sériového portu. Řídicí program resetuje WATCHDOG časovač, zapíná a vypíná relé u zátěže nebo zdroje a může odečítat teplotu z teploměru. Relé jsou napájeny z nezávislého 12 V zdroje. Arduino UNO je napájeno 5 V z USB portu. Relé jsou běžně otevřená, takže při výpadku napájení se relé sama přepnou do otevřené polohy a tím baterii odpojí.



Obrázek 2.2 Ochranná relé

### 2.1.5 Adaptéry pro připojení baterie

Adaptéry pro připojení baterie slouží k uzpůsobení připojení pracoviště k měření na dané baterii. Baterie mohou mít různé vývody, kontakty i velikosti (viz obrázek 1.2, obrázek 1.3, obrázek 1.4) a nelze všechny baterie připojit přes jediný konektor bez úpravy baterie. Tužkové baterie se mohou měřit po vložení do vhodného držáku. Autobaterie naopak potřebují pro připojení svorky. Vývody baterií mohou být opatřeny třeba i závitem. Pro každý typ připojení baterie se musí vyrobit vhodný adaptér (viz obrázek 2.3). K experimentálnímu pracovišti se adaptér připojuje do svorkovnice ochranného relé. Na adaptér se také může připojit DAU pro měření napětí na baterii. Adaptér pro připojení baterie může způsobovat dodatečnou chybu měření, ale při správné výrobě a uchycení na baterii je chyba zanedbatelná. Například u NiMH článku lze měření provádět v bateriovém držáku. Nedá se však měřit napětí hned na článku, ale až na držáku. Také může být omezený maximální proud, který lze z článku v držáku odebírat. Lepšího připojení lze dosáhnout přes nabodovaný niklový pásek ke kontaktům článku, ke kterému se dají přímo připájet vodiče (obrázek 2.4). To umožňuje měřit napětí hned na článku a je zde pouze proudové omezení článku.



Obrázek 2.3 Vyrobené adaptéry pro připojení různých baterií k pracovišti



Obrázek 2.5 znázorňuje schéma zapojení celého obvodu experimentálního pracoviště. Elektronická zátěž a regulovatelný zdroj jsou paralelně připojené vodiči na ochranná relé. K ochranným relé je připojena baterie pomocí svého vhodného adaptéru.

Pro měření napětí na baterii se DAU připojuje do obvodu v těsné blízkosti baterie. Při měření jednotlivých článků je vhodné připojit DAU na balanční konektor baterie nebo přímo na vývody jednotlivých článků baterie.

Mikrokontrolér Arduino UNO je napájený 5V z USB portu. Relé jsou napájena ze samostatného 12 V zdroje.

Elektronická zátěž, regulovatelný zdroj a DAU jednotka jsou pomocí USB/GPIB převodníku N10149 řízeny vytvořenou aplikací. Obvody ochrany jsou aplikací řízeny prostřednictvím USB rozhraní.

## 2.2 Ovládání a komunikační rozhraní

### 2.2.1 GPIB

GPIB (sběrnice rozhraní pro všeobecné účely) umožňuje standardizovanou komunikaci a kontrolu mezi zařízeními od různých výrobců. GPIB je někdy označováno podle původně používaného názvu HP-IB nebo podle označení standartu IEEE jako IEEE-488. [20][21]

GPIB konektory a kabely propojující zařízení se skládají z celkem 24 linek, z nichž 8 je datových, 5 je určeno na řízení rozhraní, 3 jsou určeny pro řízení přenosu dat a zbývající linky jsou použity na další účely. Tyto linky jsou sdílené se všemi připojenými zařízeními na GPIB sběrnici. Zapojování je možné lineárně, do hvězdy nebo kombinovaně. Maximální rychlost přenosu dat může být až 1 MB za sekundu, záleží však na rychlosti nejpomalejšího přístroje. Data nelze přenášet z více zařízení najednou. Celkem může být připojeno až 15 zařízení na jedné GPIB sběrnici bez použití přídavného rozšíření sběrnice. [20][21]

Řízení GPIB sběrnice má na starost aktivní ovladač, který zadává příkazy a získává data jednotlivých zařízení. Většinou se jedná o počítač s rozšiřující kartou nebo adaptérem. Pro měřicí pracoviště jsem využil adaptér N10149 od firmy Agilent, který převádí GPIB na USB do počítače. Každý ovladač a kontrolované zařízení mají svoji unikátní adresu sloužící k identifikaci zařízení připojených ke sběrnici. [20][21]

Pro řízení se využívají SCPI příkazy (standartní příkazy pro programovatelné přístroje). Jedná se o sadu příkazů, které umožňují jednoduchou adaptaci napsaných řídicích programů pro různé přístroje. Příkazují přístroji provést specifickou operaci. Tyto příkazy mohou být napsané v různých programovacích jazycích, ve který se mění skladba příkazu. [20][21]

## 2.2.2 Řídící program

Řídící program jsem naprogramoval v programu Matlab App Designer, který umožňuje vytvořit grafické rozhraní pro použití běžným uživatelem. Matlab App Designer je nadstavba programu Matlab, který je používán k tvorbě matematických modelů, simulací a různých programů. Přes grafické rozhraní se spouští naprogramované příkazy, které vykonávají požadované operace. Program Matlab samotný umožňuje řídit přístroje přes GPIB sběrnici.

V grafickém rozhraní programu si uživatel nastaví parametry cyklování jako počet cyklů, měření článků vícečlánekových baterií, hodnoty proudů, hodnoty napětí, vypínací podmínky a další nastavení. Pro měření je nezbytně nutné mít zapojený regulovatelný zdroj a elektronickou zátěž.

Nastavení cyklování a měření jednotlivých článků	
Počet článků	2
Režim cyklování	VN
Bezpečnostní napěťový limit článku	Počet cyklů
MAX (V)	4.20
MIN (V)	3.00
	Pauza mezi fázemi cyklu (s)
	3600

Obrázek 2.6 Nastavení cyklování a měření jednotlivých článků

V nastavení cyklování (obrázek 2.6) se volí mezi čtyřmi režimy cyklování: VN, NV, N, V – kde N znamená nabíjení a V vybíjení. VN - cyklus začne vybíjením baterie, po něm následuje nabíjení. NV - cyklus začne nabíjením baterie, po něm následuje vybíjení. N – pouze nabije baterii. V - pouze vybije baterii. Režimy VN a NV umožňují nastavit počet opakování cyklu. Počet článků určuje počet měřených článků u vícečlánekových baterií. Je nutné nastavit minimální a maximální napětí na článku, jedná se o jednu z vypínacích podmínek. Pauza mezi fázemi cyklu umožňuje nastavit prodlevu mezi nabíjecí a vybíjecí fází cyklu. Tato doba platí jak mezi nabíjecí a vybíjecí fází cyklu, tak i mezi vybíjecí a nabíjecí fází cyklu. Délka této doby je udávána v technické dokumentaci nebo v normě. Baterie má během pauzy mezi cykly čas vychladnout a ustálit hodnotu napětí.

Nastavení nabíjení	
Nabíjecí proud (A)	Maximální napětí (V)
<input type="text" value="1.000"/>	<input type="text" value="13.00"/>
Vypínací podmínky	
<input type="checkbox"/> Maximální napětí	
<input checked="" type="checkbox"/> Pokles proudu (A)	<input type="text" value="0.2"/>
<input type="checkbox"/> Dodaný náboj	
<input checked="" type="checkbox"/> Doba nabíjení (s)	<input type="text" value="2.556e+05"/>

Obrázek 2.7 Nastavení nabíjení

Nastavení nabíjení (obrázek 2.7) umožňuje vybrat ze čtyř vypínacích podmínek. Vypínacími podmínkami jsou dosažení hodnoty maximálního napětí, pokles nabíjecího proudu na danou hodnotu, dodání nastaveného množství elektrického náboje a doba nabíjení. Při zvolení více podmínek najednou se nabíjení ukončí po dosažení jedné ze zvolených podmínek. Maximální napětí určuje hodnotu napětí zdroje, při jehož dosažení se zdroj přepne do režimu konstantního napětí. Nejvyšší napětí, které je možné nastavit je 25 V. Nastavení nabíjecího proudu určuje maximální hodnotu proudu, kterou může zdroj při nabíjení dosáhnout. Nejvyšší hodnota nabíjecího proudu je 1 A.

Nastavení vybíjení	
Druh zátěže:	<input type="text" value="Konstatní proud"/>
	Minimální napětí (V)
	<input type="text" value="11.00"/>
	Proud (A)
	<input type="text" value="11.000"/>

Obrázek 2.8 Nastavení vybíjení

V nastavení vybíjení (obrázek 2.8) lze nastavit elektronickou zátěž na jeden ze dvou režimů, kterými jsou zatěžování konstantním odporem nebo odebrání konstantního proudu. Po výběru jednoho ze dvou režimů se nastavuje příslušná velikost dané veličiny. Maximální vybíjecí proud je omezen na 16 A. Konstantní odpor lze nastavit od 0,067 do 2000  $\Omega$ . Elektronická zátěž může odebrat maximálně 150 W z baterie. Řídící program

po stisknutí tlačítka nastavit připojí elektronickou zátěž, změří napětí na baterii, porovná ho s maximálním napětím a z vyššího vypočítá, zdali není překročeno odebrání 150 W. Při zatěžování konstantním odporem se navíc kontroluje velikost proudu, aby nepřekročila 16 A. Minimální napětí udává velikost napětí, po jehož dosažení se ukončí vybíjecí cyklus. Při velkém poklesu napětí pod nastavenou hodnotu minimálního napětí se měření přeruší.

Další nastavení	Měření odporu
DAU 34970A	
<input checked="" type="checkbox"/> Měřit teplotu: 34970A	<input type="checkbox"/> Korekce napětí nabíjení
<input checked="" type="checkbox"/> Měřit napětí na baterii	<input checked="" type="checkbox"/> Měřit napětí po vypnutí
Doba měření (s)	3600
Arduino	
<input checked="" type="checkbox"/> Měřit teplotu: Arduino	<input checked="" type="checkbox"/> Hlídnání baterie

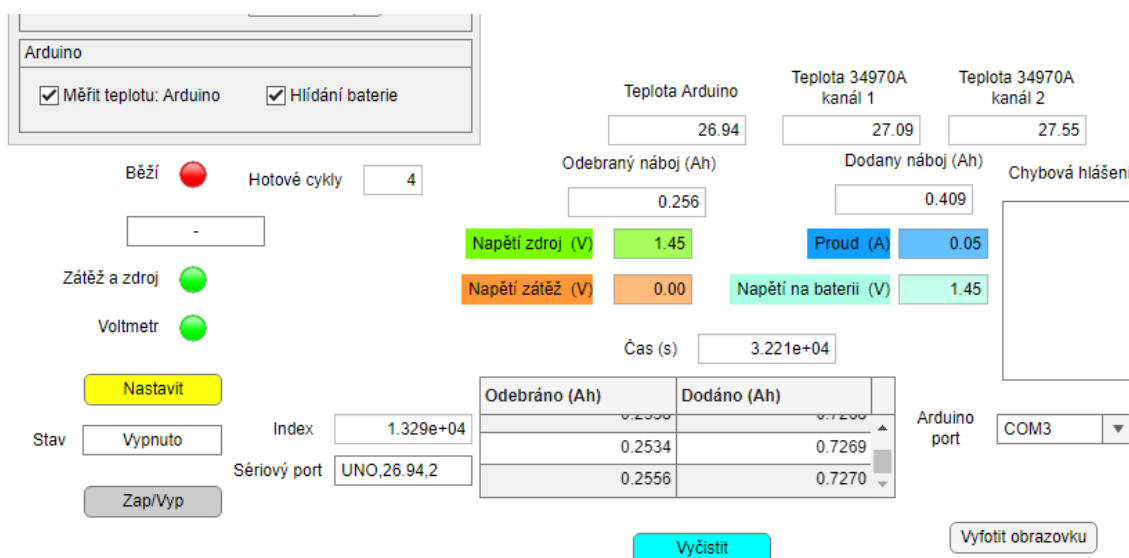
Obrázek 2.9 Další nastavení

V dalších nastaveních (obrázek 2.9) lze zapnout nebo vypnout měření napětí na baterii, měření napětí po vypnutí, korekce napětí nabíjení nebo měření teplot. Je zde také možnost měřit bez ochranných relé vypnutím nastavení hlídání baterie. S vypnutým hlídáním baterie nepožaduje řídicí program připojení ochranných relé a lze měřit bez nich. Cyklovat baterie bez ochranných relé nedoporučuji, zejména pokud se měří lithiové baterie, které mohou snadno začít při špatné manipulaci hořet. Měření napětí na baterii umožňuje za pomoci DAU měřit napětí v blízkosti baterie. Korekce nabíjecího napětí kompenzuje úbytek napětí mezi zdrojem a baterií. Regulovatelný zdroj nemá vývody pro měření a kompenzaci napětí, proto je napětí na baterii upravováno řídicím programem za pomoci napětí změřeného na baterii. Korekci napětí nabíjení lze použít pouze spolu s měřením napětí v blízkosti baterie, podle kterého program určuje odchylku od nastavené maximální hodnoty napětí. Měření napětí po vypnutí umožňuje za pomoci DAU měřit po nastavenou dobu průběh napětí na baterii po dokončení všech cyklů. Měření napětí po vypnutí měří celkové napětí baterie, popřípadě podle nastavení cyklování měří i teploty nebo napětí na jednotlivých člancích.



Obrázek 2.10 Měření vnitřního odporu baterie

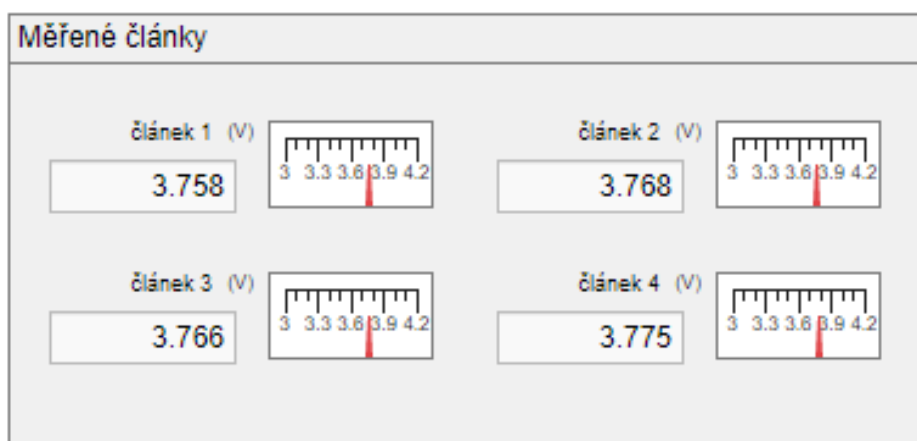
Měření odporu (obrázek 2.10) umožňuje měřit vnitřní odpor baterie. Je použitý výpočet odporu pomocí podílu změny napětí změnou proudu. V měření odporu se nastaví krok, kterým se bude zvyšovat odebíraný proud, a maximální proud, který určuje nejvyšší odebíraný proud, po jehož dosažení se měření dokončí. Měřit odpor lze pouze před zahájením cyklování nebo po dokončení cyklování. Naměřené hodnoty se zapisují do jednoho souboru pojmenovaného podle txt souborů, do kterých se ukládají naměřená data z cyklování. Opakovaným měřením se data zapisují do stejného souboru pod již naměřená data.



Obrázek 2.11 Zobrazení aktuálních naměřených hodnot a ovládací tlačítka

Ovládací tlačítka programu ukazuje obrázek 2.11. Stisknutím tlačítka nastavit zkontroluje program komunikaci s měřicími přístroji, zkontroluje nastavení zátěže a nastaví měřicí přístroje podle požadovaných parametrů. Uživatel je rovněž dotázán na pojmenování souboru, do něhož se ukládají data. Pokud bude jméno souboru stejné jako již existující soubor, bude starý soubor smazán. Na existenci stejně pojmenovaného souboru je uživatel upozorněn. Data se ukládají do souboru ve formátu txt. Zápis dat probíhá po každém změření vzorku. Po úspěšném nastavení programu se odemkne možnost spuštění samotného měření. Měření se spouští a pozastavuje pomocí tlačítka zap/vyp. V průběhu cyklování lze po pozastavení měření měnit vypínací podmínky, maximální a minimální napětí, počet cyklů nebo velikost proudů. Měření napětí po vypnutí lze ukončit změnou doby běhu nebo jeho vypnutím v nastavení i po jeho spuštění. Změnu počtu článků, zapnutí či vypnutí měření teplot nebo měření napětí na baterii v průběhu cyklování nedoporučuji kvůli ztrátě celistvosti naměřených dat, a proto by se měla provádět pouze před prvním spuštěním zatěžovacího cyklu. Režim cyklování lze nastavit pouze před prvním spuštěním cyklu a nelze ho v průběhu cyklování měnit. V řídicím programu lze také nastavit adresu mikrokontroléru Arduino UNO. Tlačítka vyfotit obrazovku lze použít k zaznamenání nastavení měření. Tlačítka vyčistit umožňují začít nové měření se stejným nastavením a bez potřeby znovu zapnout celý program.

Bezpečnost cyklování baterie je zajištěna v řídicím programu porovnáváním změřených hodnot s nastavenými parametry zatěžování. Během nabíjení se kontrolují vypínací podmínky pro ukončení nabíjecí části cyklu. U baterií s měřením jednotlivých článků se nabíjení dokončí i při dosažení maximálního napětí na článku. Dále se u baterie sleduje velikost napětí a při značném poklesu napětí pod hodnotu nastaveného minimálního napětí, což by naznačovalo vznik zkratu v obvodu, se měření pozastaví. Ve vybíjecí části cyklu se dosažením minimálního napětí vybíjení baterie dokončí a pokračuje se dále v cyklování. Při poklesu nabíjecího proudu na nulu, což by značilo přerušení obvodu, se nabíjení taktéž pozastaví. U baterií s měřením jednotlivých článků se vybíjení dokončí při dosažení minimálního napětí na kterémkoliv článku. Během měření je také kontrolována komunikace s měřicími přístroji a s Arduino UNO. V případě problémů s komunikací bude měření přerušeno, ale po opětovném nastavení řídicího programu lze měření znovu spustit. V případě vzniku chyby, která by vedla k ukončení řídicího programu, naprogramovaný časovač WATCHDOG v mikrokontroléru Arduino UNO po určité době, kdy řídicí program nekomunikuje, odpojí pomocí ochranných relé zdroj či zátěž od baterie. Tím je zamezeno přebíjení nebo úplnému vybití baterie.



Obrázek 2.12 Zobrazení aktuálních hodnot napětí na článcích

Při probíhajícím měření získává řídicí program průběžně data z měřících přístrojů. Naměřená data se srovnávají s vypínacími podmínkami a následně se zapisují do příslušného txt souboru. Velikost odebraného/dodaného náboje se postupně přičítá při každém získání hodnot z přístrojů. Naměřená velikost proudu se vynásobí s uplynulým časem mezi aktuálním a předchozím získáním dat a přičte se k náboji. Každé získání a zpracování dat zabere 1 až 2 sekundy v závislosti na výkonu použitého počítače, rychlosti komunikace mezi přístroji a počtem měřených článků. Aktuální naměřené hodnoty jsou zobrazovány v programu pod příslušnou kolonkou, viz obrázek 2.11 a obrázek 2.12. U měření s více cykly se v programu zaznamenávají do tabulky odebrané a dodané náboje pro možnost rychlého porovnání změn.

Při splnění vypínacích podmínek program přepne pracoviště do další fáze cyklování nebo měření zastaví. Napětí a proud se zaznamenávají podle fáze cyklu. Při nabíjení se zaznamenávají hodnoty napětí a proudu z regulovatelného zdroje. Naopak při vybíjení se ukládá napětí a proud měřené z elektronické zátěže. Při výpadku měřícího přístroje nebo při velkém poklesu napětí se cyklování okamžitě přerušuje a může být obnoveno pouze manuálním spuštěním.

Po dokončení měření lze při použití VN a NV režimu bez měření napětí po konci cyklování přidat cykly a pokračovat v původním měření nebo začít měření nové. Pro nové měření lze využít tlačítko vyčistit, které vymaže použitý název souboru sloužícího k ukládání dat, nastavení měření zůstává zachováno. Pro úplně nové měření je vhodnější program restartovat. Na předchozí naměřená data navázat nelze. Pokud bude program ukončen nebo bude použito tlačítko vyčistit, může být zahájeno pouze nové měření a při použití stejného názvu budou staré soubory smazány.

Naměřená data lze převést ze souboru txt na soubor.xlsx. V souborech.txt i.xlsx jsou u každé veličiny uvedeny její příslušné jednotky a data jsou pro snadnější zpracování podrobně popsána. U změřených napětí jednotlivých článků vícečlánekových baterií jsou uvedena jednotlivá čísla článků.

## 3. MĚŘENÍ PARAMETRŮ BATERIÍ

### 3.1 Nastavení a obsluha pracoviště před, během a po měření

#### 3.1.1 Příprava pracoviště pro měření

Před zahájením cyklování baterie je potřeba zapnout měřicí přístroje a vyčkat jednu hodinu, aby měřicí přístroje měřily s danými odchylkami měření uváděnými výrobcem. Následně by měla být provedena kontrola připojení přístrojů k ochranným relé a zkouška nastavení i měření měřících přístrojů. Po provedení těchto kroků se může přejít k samotnému měření připojením baterie k pracovišti a nastavením požadovaného průběhu cyklování.

Baterie se připojí k ochranným relé přes vhodný adaptér. Na baterii se umístí teploměr, který je připojený k mikrokontroléru Arduino UNO používanému k zastavení měření při překročení teploty 42 °C. K baterii se podle požadavků měření připojí měření napětí na baterii a měření teploty pomocí DAU. U baterií s více články se připojí měření jednotlivých článků. Při měření lithium-iontových baterií s více články se pro bezpečné cyklování musí měření jednotlivých článků připojit.

Po připojení baterie k pracovišti se může nastavit průběh cyklování v řídicím programu. Zvolí se režim cyklování, počet cyklů, počet měřených článků. Pro nabíjení se nastaví nabíjecí proud, maximální napětí a vypínací podmínky nabíjení. Při zapnutí regulace nabíjecího napětí bude řídicí program kompenzovat úbytek napětí mezi zdrojem a baterií tak, aby bylo na svorkách baterie udržováno nastavené konstantní maximální napětí. Pro vybíjení se nastaví režim zatěžování konstantním proudem nebo odporem a nastaví se jejich velikost. V dalších nastaveních se zapne nebo vypne měření teplot, měření přesného napětí na baterii, regulace nabíjecího napětí a měření napětí po vypnutí. Po prvním zmáčknutí tlačítka nastavit se zvolí název souborů, do kterých se budou naměřená data ukládat. Vybírá se zde také mezi formáty txt a xlsx pro uložení naměřených dat.

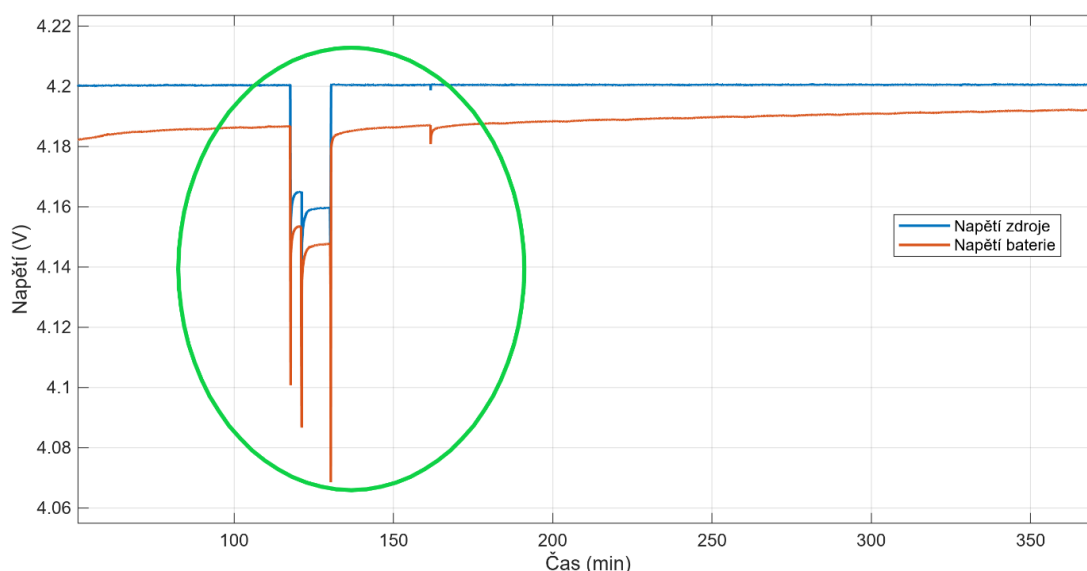
Po nastavení řídicího programu lze zapnout samotné měření nebo změřit odpor na baterii. Konfiguraci programu lze vyfotit a uložit pomocí tlačítka vyfotit.

#### 3.1.2 Pozastavení měření v průběhu cyklování

V průběhu cyklování může být měření pozastaveno uživatelem nebo vznikem chyby během měření, která však neukončí řídicí program. Po pozastavení měření lze bez obtíží měnit maximální a minimální napětí, nabíjecí i vybíjecí proud nebo odpor a počet cyklů v režimech VN a NV. Nastane pouze zkreslení měření (viz obrázek 3.1).

Během cyklování by se neměly zapínat nebo vypínat prvky v dalších nastaveních (obrázek 2.9) nebo měnit počet měřených článků (obrázek 2.6). Tato nastavení mění počet měřených veličin. Při změně těchto nastavení lze měření spustit, ale daná fáze

měření, ve které bylo měření pozastaveno a byla změněna tato nastavení, nebude mít naměřená data konzistentní. Další fáze cyklování již budou obsahovat všechny měřené hodnoty. Před pokračováním měření je při změně nastavení cyklování nebo při chybě měřících přístrojů nutno stisknout tlačítko nastavit. Režim cyklování lze měnit pouze před prvním spuštěním měření. Použitím tlačítka vyčistit lze začít nové měření bez nutnosti znovu nastavit parametry celého měření.



Obrázek 3.1 Příklad vlivu pozastavení a změny parametrů měření na průběhy napětí (vyznačeno zeleně)

### 3.1.3 Pokračování v měření po ukončení cyklování

Po dokončení cyklování v režimech VN a NV bez použití měření po skončení cyklování lze přidat počet cyklů, po které pracoviště baterii zatěžuje. Po ukončení cyklování lze měřit odpor baterie. Při použití tlačítka vyčistit v řídicí programu se zahájí nové měření se zachováním nastavených parametrů. Při vypnutí a zapnutí řídicího programu se nastavené parametry cyklování nezachovají. Pokud je řídicí program ukončen v průběhu cyklování nebo by nastala chyba, po které by byl řídicí program ukončen, musí se cyklování baterie provést znovu. Po jakémkoliv ukončení programu nelze navázat na nedokončený průběh cyklování. Pokud by byl zvolen stejný název souborů jako v předchozích měření, budou tyto soubory přepsány.

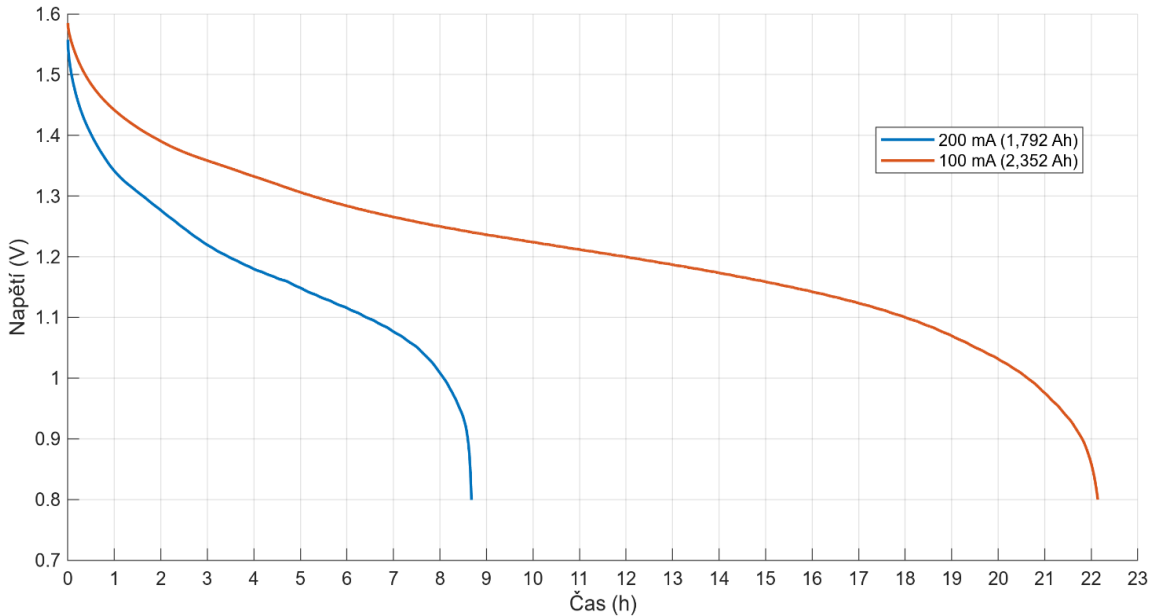
### 3.1.4 Měření odporu baterie

Měřit vnitřní odpor baterie lze před začátkem cyklování a po skončení cyklování. V průběhu cyklování a během pozastaveného měření se nemůže měření odporu baterie používat. Možnost měřit odpor se odemkne při stisknutí tlačítka nastavit. Spuštěním měření se možnost měřit odpor uzamkne, dokud není opět stisknuto tlačítko nastavit. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v řídicím programu a zapsány do příslušného txt

souboru. Opakovaným měřením odporu se nově změřené hodnoty zapíší do stejného souboru pod předchozí naměřené hodnoty.

## 3.2 Výsledky měření

### 3.2.1 Měření kapacity alkalické baterie pro různé odebírané proudy

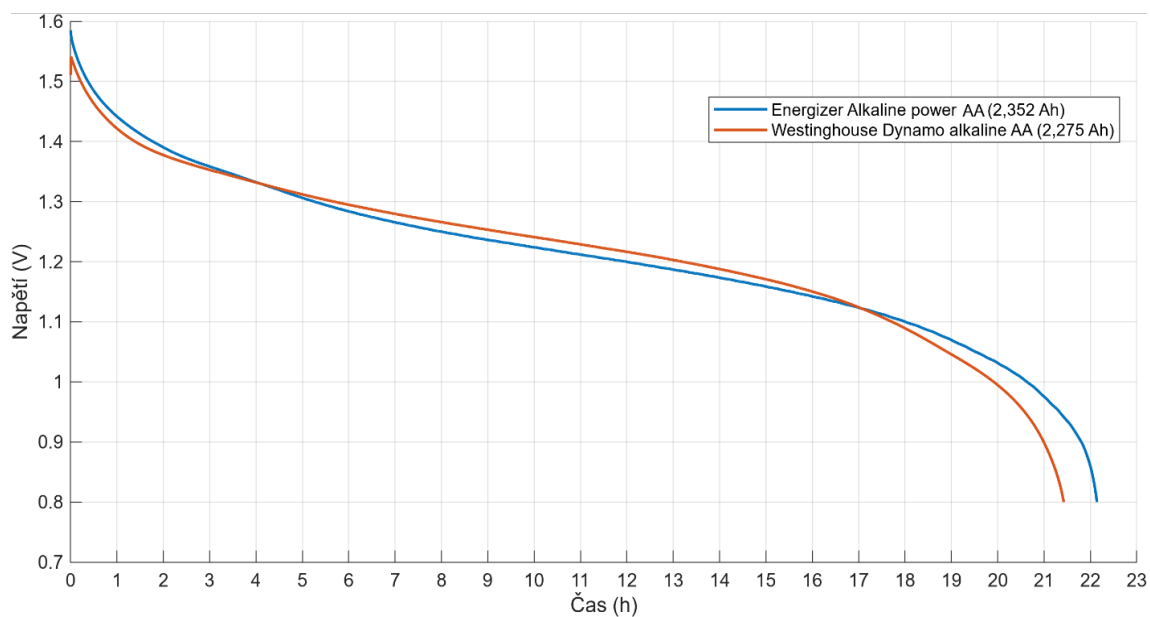


Obrázek 3.2 Průběhy napětí na alkalické baterii při vybíjení 100 a 200 mA

Byla změřena kapacita alkalické baterie Energizer Alkaline power AA při odběru konstantního proudu 100 a 200 mA do napětí 0,8V. Teplota okolí byla udržována na 23 °C. Obrázek 3.2 zobrazuje průběhy napětí při nastaveném vybíjecím proudu 100 a 200 mA. Vlivem chyby nastavení zátěže se skutečný proud pohyboval kolem 106 a 206 mA. Při odběru konstantního proudu 100 mA měla baterie naměřenou kapacitu 2,352 Ah. Při odběru proudu 200 mA měla baterie naměřenou kapacitu pouze 1,792 Ah. Při odběru vyšších proudů klesá na baterii rychleji napětí především díky vnitřnímu odporu, na kterém se tvoří vyšší úbytek napětí. Baterie pak rychleji dosáhne stanoveného hraničního napětí a nemůže dodat tolik náboje.

Naměřená kapacita při odběru 100 mA odpovídá technické dokumentaci, kde při 100 mA je kapacita udávána kolem 2,3 Ah při 21 °C [22].

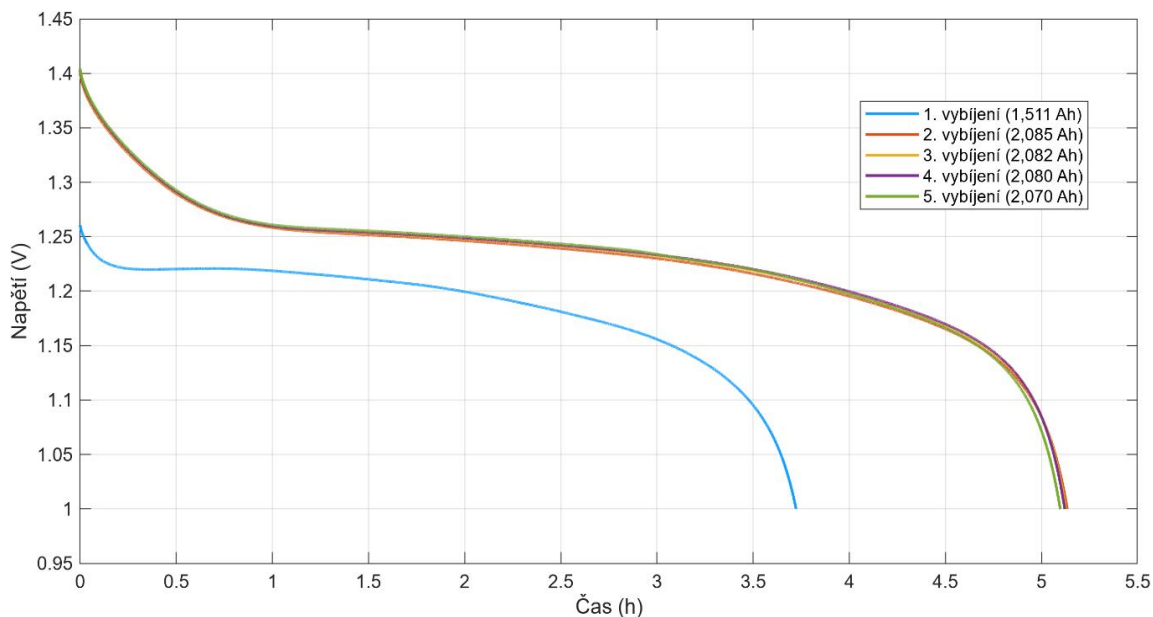
### 3.2.2 Porovnání kapacit dvou různých alkalických baterií



Obrázek 3.3 Průběh napětí dvou různých alkalických baterií při vybíjení 100 mA

Byly změřeny kapacity dvou různých alkalických baterií. Obě baterie byly nastaveny na vybíjení konstantním proudem 100 mA do napětí 0,8 V. Teplota okolí byla udržována na 23 °C. Vlivem chyby nastavení zátěže se skutečný proud pohyboval kolem 106 mA. U baterie Energizer Alkaline power AA byla naměřena kapacita 2,352 Ah. U baterie Westinghouse Dynamo alkaline AA byla naměřena kapacita 2,275 Ah. Obrázek 3.3 znázorňuje průběhy napětí při vybíjení měřených baterií.

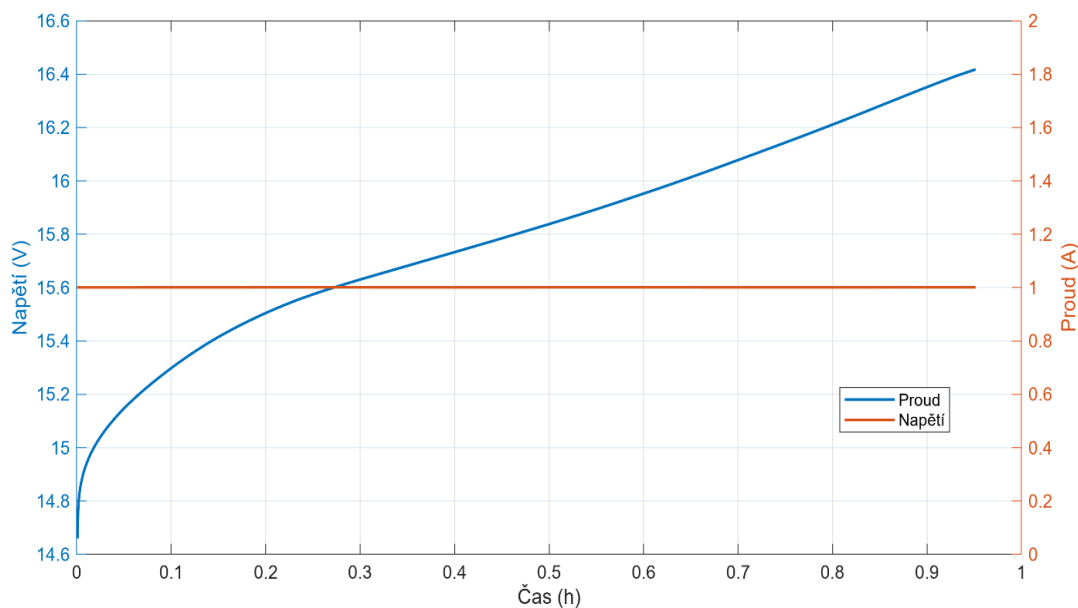
### 3.2.3 Měření nominální kapacity NiMH článku Nexcell 2000 mAh



Obrázek 3.4 Průběhy napětí při vybití NiMH článku Nexcell proudem 400 mA

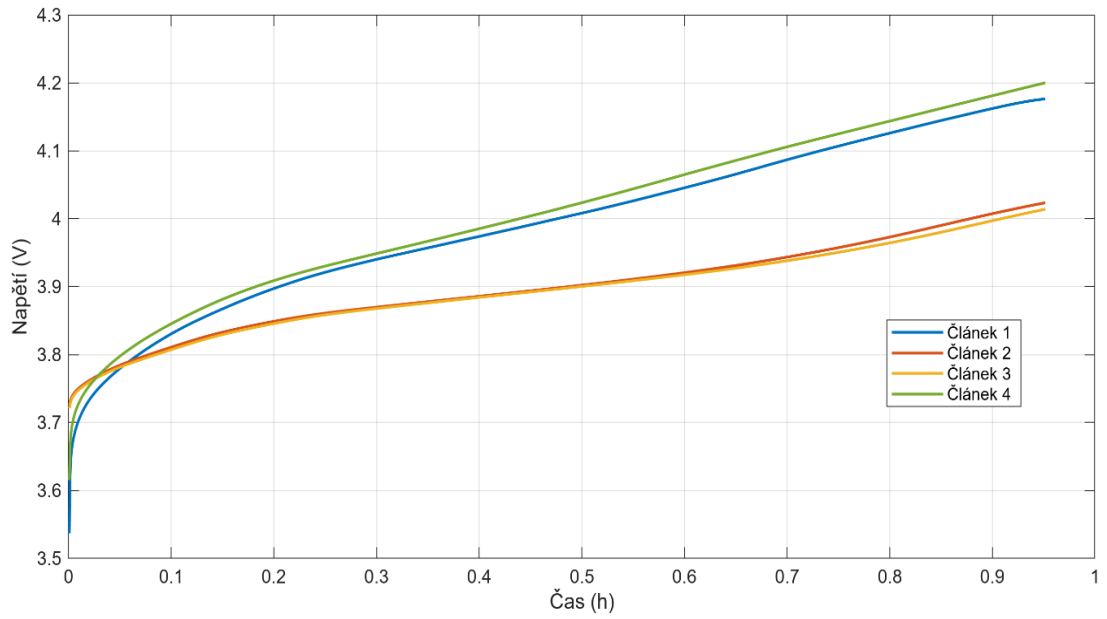
Byla měřena nominální kapacita nového NiMH článku Nexcell 2000 mAh (AA). Nominální kapacita 2000 mAh tohoto článku je dána pro vybití konstantním proudem 400 mA do napětí 1 V při 20 °C. Baterie byla vybita při stejných podmínkách. Vlivem chyby nastavení zátěže se skutečný proud pohyboval kolem 406 mA. Baterie byla nabíjena konstantním proudem 200 mA po dobu 16 h. První vybití měřilo stav nabití článku od výrobce, proto vyšla kapacita pouze 1,511 Ah. To je přibližně 75% jmenovité kapacity baterie. Následná vybití baterie probíhala již po plném nabití baterie. Naměřené kapacity vyšly vyšší jak při prvním měření. Naměřené kapacity baterie od druhého měření potvrzují správnost dané nominální kapacity, která má být u nového článku nižší nebo rovna skutečné naměřené kapacitě. Obrázek 3.4 znázorňuje průběhy napětí při vybití článku. Po prvním vybití vycházely již další průběhy vybití skoro totožně. Při nabíjení byl dodán náboj 3,205 Ah.

### 3.2.4 Měření průběhů nabíjení 4čládkové lithium-iontové baterie

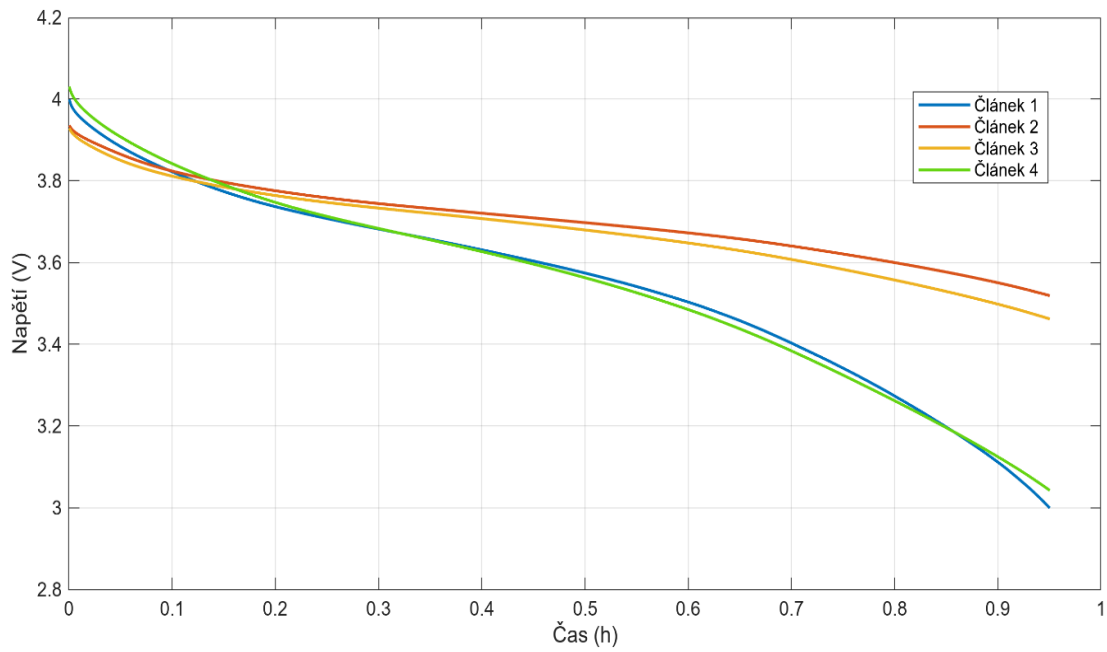


Obrázek 3.5 Průběh celkového napětí a proudu při nabíjení 4čládkové baterie

Byly změřeny průběhy napětí a proudu při nabíjení 4čládkové lithium-iontové baterie Pecka Power 2600 mAh 14,8V. Teplota okolí byla 25 °C. Baterie byla nabíjena proudem 1 A do napětí 16,8 V s koncem nabíjení při poklesu proudu na 200 mA. Minimální napětí na článek bylo nastaveno na 3 V a maximální napětí na článek 4,2 V. Baterie nemá zabudovaný balanční systém. V průběhu nabíjení, kdy celkové napětí baterie nedosáhlo ani maximální hodnoty napětí (viz obrázek 3.5), se článek 4 dostal na maximální hodnotu svého napětí 4,2 V (viz obrázek 3.6). Tím bylo nabíjení dokončeno. Oproti článkům 2 a 3 se články 1 a 4 nabíjely rychleji. To může být způsobeno buď odlišnou kapacitou jednotlivých článků nebo různým stupněm nabití jednotlivých článků. Následným kontrolním vybíjením bylo zjištěno, že článek 1. a 4. se i rychleji vybíjí (viz obrázek 3.7). To znamená, že články 1 a 4 této baterie mají sníženou kapacitu oproti článkům 2 a 3.



Obrázek 3.6 Průběh napětí na jednotlivých člancích při nabíjení 4článekové baterie



Obrázek 3.7 Průběh napětí na jednotlivých člancích při vybíjení 4článekové baterie

## 4. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo sestavit pracoviště schopné cyklicky zatěžovat baterie a měřit jejich parametry, mezi které řadíme nabíjecí a vybíjecí charakteristiky, kapacitu a vnitřní odpor. Před sestavením a zapojením experimentálního pracoviště jsem se seznámil s typy běžně používaných bateriových článků a jejich vlastnostmi. Z technické dokumentace a literatury jsem získal informace o nabíjecích a vybíjecích charakteristikách baterií, které se skládají z jednoho či více článků, a využil je při návrhu pracoviště.

Pro cyklické zatěžování baterií jsem vybral elektronickou zátěž a programovatelný zdroj. Za účelem měření napětí na jednotlivých člancích a teploty baterie jsem zvolil DAU jednotku, kterou jsem využil i pro měření napětí na baterii. Po komplekaci potřebných měřicích přístrojů jsem naprogramoval řídicí program. Při testování pracoviště a řídicího programu jsem řešil problém s bezpečností měření bez obsluhy. Při chybě v řídicím programu nebo počítači mohlo dojít k neřízenému zatěžování baterie. Také bylo potřeba připojit pouze přístroje potřebné pro danou fázi cyklování baterie. Proto jsem experimentální pracoviště vybavil ochrannými relé, která jsou řízena pomocí programu WATCHDOG v mikrokontroléru Arduino UNO.

Po dokončení pracoviště a řídicího programu jsem ověřoval funkčnost pracoviště, bezpečnostních prvků a vypínacích podmínek. Ověřoval jsem správné nastavení měřicích přístrojů podle parametrů zatěžování baterie zadaných do řídicího programu, schopnost dlouhodobě měřit a zapisovat data. Následně jsem ověřoval bezpečnostní prvky a vypínací podmínky. V řídicím programu jsou kontrolovány hodnoty proudu a jednotlivá napětí jak na celé baterii, tak i na jednotlivých člancích. Při překročení stanovených mezí musí řídicí program zareagovat. Byla ověřena funkčnost všech vypínacích podmínek a jejich kombinací, které ukončují danou fázi zatěžování baterie. Bylo úspěšně vyzkoušeno ukončení měření při poklesu napětí pod nastavenou hodnotu minimálního napětí, které by značilo možný zkrat v obvodu. Ověřeno bylo také ukončení cyklování v případě výpadku komunikace s měřicími přístroji a mikrokontrolérem. Taktéž byla ověřena funkčnost ochranných relé. Bylo vyzkoušeno automatické odpojení baterie při překročení maximální dovolené teploty. V průběhu měření proběhla simulace výpadku komunikace počítače a ochranná relé správně odpojila baterii.

Po dokončení funkčních a bezpečnostních zkoušek jsem začal měřit parametry u různých baterií. Z naměřených hodnot byla získána velikost kapacity zatěžované baterie, která je rovna odebranému náboji, a dodaný náboj. Z průběhů naměřených hodnot napětí a proudu byly vytvořeny nabíjecí či vybíjecí charakteristiky.

Experimentální pracoviště pro analýzu baterií, postavené na základě potřeby Ústavu fyziky, bylo úspěšně zhotoveno a odzkoušeno. Pracoviště je schopné zatěžovat baterie podle zvolených parametrů a měřit potřebné veličiny pro vyhodnocení parametrů baterií.

## LITERATURA

- [1] ARENDÁŠ, Miroslav a RUČKA, Milan. *Nabíječky a nabíjení*. 2. aktualiz. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-860-5629-5.
- [2] BATTEX, SPOL. S R.O. *Abeceda baterií a akumulátorů*. Online. 2009, 2024. Dostupné z: [www.battex.info](http://www.battex.info) . [cit. 2024-03-06].
- [3] HUGGINS, Robert A. *Energy storage: fundamentals, materials and applications*. Second edition. Cham: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-21238-8.
- [4] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 61434, *Akumulátorové články a baterie obsahující alkalický nebo jiný nekyselý elektrolyt-Pokyny pro značení proudu v normách pro alkalické a akumulátorové články a baterie*. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o. [ČSN], Srpen 1998
- [5] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 61056-1, *Olověné baterie pro všeobecné použití (typy s regulačním ventilem)-Část 1: Základní požadavky, funkční charakteristiky- Metody zkoušek*. 3. edice. Praha: Česká agentura pro standardizaci s.p.o. [ČSN], květen 2013.
- [6] *Battery Internal Resistance: TECHNICAL BULLETIN*. Online. In: ENERGIZER. Energizer Battery and Charger Technical Information. 2000, 2024. Dostupné z: <https://data.energizer.com/pdfs/batteryir.pdf>. [cit. 2024-04-28].
- [7] MICROPOWER BATTERY COMPANY. *PRIMARY BATTERY OPTIONS: A LOOK AT LITHIUM BATTERIES*. Online. MICROPOWER BATTERY COMPANY. MicroBattery.com. 2021, 2023. Dostupné z: <https://www.microbattery.com/primary-lithium-batteries>. [cit. 2023-11-02].
- [8] LI, Lucky. *Principle and performance analysis of zinc carbon battery*. Online. In: TYCORUN ENERGY. Takomabattery. 2022, 2023. Dostupné z: <https://www.takomabattery.com/zinc-carbon-battery/>. [cit. 2023-11-13].
- [9] PISTOIA, Gianfranco. *Lithium-Ion Batteries - Advances and Applications*. Online. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-444-59513-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U81K71/lithium-ion-batteries/front-matter>. [cit. 2023-10-25].
- [10] CLOUD, Maria. *What is the Energy Density of a Lithium-Ion Battery?* Online. In: FLUX POWER. Flux Power. California: Flux Power, 2023. Dostupné z: <https://www.fluxpower.com/blog/what-is-the-energy-density-of-a-lithium-ion-battery>. [cit. 2023-11-13].
- [11] HANLEY, Steve. *Chinese Researchers Announce 711 Wh/kg Lithium Battery*. Online. In: CLEANTECHNICA. CleanTechnica. 2023. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2023/04/25/chinese-researchers-announce-711-kwh-kg-lithium-battery/>. [cit. 2023-11-13].

- [12] *Panasonic UR18650F Batteries Datasheet*. Online. In: PANASONIC INDUSTRY. Electronic Components | Panasonic Industrial Device. 2023. Dostupné z: [https://api.pim.na.industrial.panasonic.com/file\\_stream/main/fileversion/3449](https://api.pim.na.industrial.panasonic.com/file_stream/main/fileversion/3449). [cit. 2023-12-12].
- [13] *Introduction of Nickel Metal Hydride Battery: Nickel Metal Hydride Battery*. Online. In: PANASONIC INDUSTRY. Panasonic INDUSTRY. 2023. Dostupné z: <https://industrial.panasonic.com/ww/products/pt/nickel-metal/documents>. [cit. 2023-11-18].
- [14] *BK110AAO*. Online. In: PANASONIC INDUSTRY. Panasonic INDUSTRY. 2023. Dostupné z: <https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf2/ACG4000/ACG4000CE289.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [15] *Technical-Manual.pdf: SEALED LEAD-ACID BATTERIES*. Online. In: POWER-SONIC CORPORATION. Power Sonic. 2023. Dostupné z: <https://www.power-sonic.com/wp-content/uploads/2018/12/Technical-Manual.pdf>. [cit. 2023-11-20].
- [16] *OPTIMA-COMMERCIAL-DATASHEET.pdf*. Online. In: TAYNA. Tayna Batterie. 2023. Dostupné z: <https://cdn.tayna.com/datasheets/OPTIMA-COMMERCIAL-DATASHEET.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [17] *N3300A Series DC Electronic Loads.pdf: N3300 Series DC Electronic Loads*. Online. In: KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Keysight. 2000, 2023. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06712/data-sheets/5980-0232.pdf>. [cit. 2023-11-27].
- [18] *5968-9726.pdf: Keysight E363xA Series Programmable DC Power Supplies*. Online. In: KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Keysight. 2000, 2023. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/product/E3631A/80w-triple-output-power-supply-6v-5a--25v-1a.html>. [cit. 2023-11-27].
- [19] *34970A Data Acquisition\_Switch Unit Family.pdf: 34970A Data Acquisition/Switch Unit Family*. Online. In: KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Keysight. 2000, 2023. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/product/34970A/34970a-data-acquisition-control-mainframe-modules.html>. [cit. 2023-11-27].
- [20] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *GP-IB Fundamentals*. Online. KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Keysight RFMW Sitemap. 2000, 2014. Dostupné z: [https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/m9485a/programming/learning\\_about\\_gpib/gp-ib\\_fundamentals.htm](https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/m9485a/programming/learning_about_gpib/gp-ib_fundamentals.htm). [cit. 2023-11-27].
- [21] THE MATHWORKS, INC. *GPIB Overview - MATLAB & Simulink*. Online. THE MATHWORKS, INC. MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink. 1994, 2023. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/instrument/gpib-overview.html>. [cit. 2023-11-27].
- [22] *Energizer LR6 product datasheet*. Online. In: ENERGIZER. Energizer Battery and Charger Technical Information. 2000, 2024. Dostupné z: <https://data.energizer.com/pdfs/alk-power-aa.pdf>. [cit. 2024-05-23].

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

DAU	jednotka pro získávání dat
GPIO	sběrnice rozhraní pro všeobecné účely
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MB	mega byte
N	nabíjení
NiCd	nikl-kadmiové články a baterie
NiMH	nikl-metalhydridové články a baterie
NV	nabíjení pak vybíjení
RAM	náhodně přístupná paměť
SCPI	standartní příkazy pro programovatelné přístroje
SN	sériové číslo
txt	text (typ datového formátu)
USB	univerzální sériová sběrnice
V	vybíjení
VN	vybíjení pak nabíjení
VRLA	ventilem řízené akumulátory
xlsx	excel tabulkový formát XML (typ datového formátu)

### Symboly:

$C_n$	kapacita baterie vztažená k době vybíjení	(Ah)
$I_t$	referenční zkušební proud baterie	(A)

# SEZNAM PŘÍLOH

Všechny přílohy jsou v elektronické podobě

<b>PŘÍLOHA A - ŘÍDÍCÍ PROGRAM .....</b>	<b>45</b>
<b>PŘÍLOHA B - WATCHDOG .....</b>	<b>46</b>