

# **ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**

## **FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektrotechnologie**

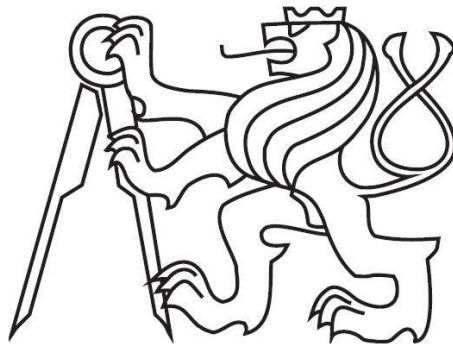
**K13113**

**Studijní program:**

**Elektrotechnika, energetika a management**

**Obor:**

**Aplikovaná elektrotechnika**



### **Bakalářská práce**

**Název práce:**

**Měření účinnosti akumulátorových článků**

**Measurement of efficiency of battery cells**

**Vypracoval: Michal Hruška**

**Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina Ph.D.**

**2017**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hruška** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **434864**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Měření účinnosti akumulátorových článků**

Název bakalářské práce anglicky:

**Measurement of efficiency of battery cells**

Pokyny pro vypracování:

- Popište používané postupy pro měření účinnosti nabíjecího procesu akumulátorových článků se zaměřením na články založené na Lithiu.
- Realizujte měřící pracoviště pro měření účinnosti nabíjecího-vybíjecího procesu akumulátorových článků.
- Proveďte sérii ověřovacích měření a výsledky vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] BUCHMANN, Isidor. Battery University [online]. Richmond, British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2016 [cit. 2016-12-09]. Dostupné z: <http://batteryuniversity.com/>
- [2] REDDY, Thomas B a David LINDEN. Linden's handbook of batteries. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2011, 1 v. (various pagings). ISBN 9780071624213.
- [3] BAJRACHARYA, Qusee. Dynamic Modeling, Monitoring and Control of Energy Storage System. Karlstad, 2013. Diplomová práce. Karlstad University. Vedoucí práce Dr. Magnus Mossberg.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Hrzina Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

# Prohlášení

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

# Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Pavlu Hrzinovi Ph.D. za odborné rady, pomoc a skvělé vedení při realizaci této práce.

V Praze dne .....

.....

podpis



## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na vytvoření automatizovaného pracoviště pro měření parametrů elektrochemických článků. Hlavním cílem je vytvoření programu pro automatizované měření, který je snadno modifikovatelný k dalším účelům. Výstupem je automatizace měření, zpracování dat a konečné vyhodnocení účinnosti nabíjecího/vybíjecího cyklu.

## **Abstract**

This thesis is focused on developing automated workplace for measuring properties of electrochemical cells. Main goal is programming part for automated measurement, which is easily modifiable for next purposes. Final output is automatization, data processing and final evaluation of the charge/discharge cycle efficiency.

# OBSAH

---

1	Elektrochemické články.....	7
1.1	Motivace.....	7
1.2	Historie.....	7
1.3	Základní pojmy .....	8
2	Popis článků .....	10
2.1	Dynamické systémy .....	10
2.2	Modelování baterie.....	11
3	Účinnost nabíjení/vybíjení .....	15
3.1	Energie ve formě chemické (Vlastní energie) .....	16
3.2	Účinnost nabíjení $\eta_{nab}$ .....	17
3.3	Účinnost vybíjení $\eta_{vyb}$ .....	17
3.4	Účinnost nabíjení/vybíjení.....	17
4	Přesnost měření.....	18
4.1	Zásady měření.....	18
4.2	Nejistoty měření.....	19
5	Realizace: Stanice automatického měření: „S.A.M“ .....	21
5.1	Úvod .....	21
5.2	Základní koncept (S.A.M-1).....	22
5.3	Programová část.....	25
5.4	Druhá verze (S.A.M-2).....	30
5.5	Nejistota měření (S.A.M-2).....	35
6	Série měření .....	40
6.1	Test akumulátoru GP 12260 12V/26Ah.....	40
6.2	Test akumulátoru Thundersky LP12V40AH .....	44
7	Závěr .....	46
8	Literatura .....	48
9	Seznamy a přílohy .....	50
9.1	Seznam obrázků .....	50
9.2	Seznam tabulek .....	50
9.3	Seznam grafů.....	50
10	Příloha .....	51

# 1 ELEKTROCHEMICKÉ ČLÁNKY

---

## 1.1 MOTIVACE

V současné době lze pozorovat velice prudký vývoj v oblasti elektrochemických zdrojů energie, a to zejména akumulátorů. Nutnost potřeby těchto článků je zapříčiněna mnoha faktory a širokou škálou použití.

Jako příklad bych mohl uvést rozšíření OZE (obnovitelných zdrojů energie), které není možné regulovat v takové míře, jako doposud převládající neobnovitelné zdroje. Jedna z možností uchování elektrické energie jsou právě elektrické akumulátory.

Problém uchování elektrické energie je významným problémem moderní doby, který může být řešen právě elektrochemickými články. Jejich základní vlastnosti a parametry tedy mají významnou roli.

## 1.2 HISTORIE

Princip funkce elektrochemických článků je znám více než 200 let a je jedním z nestarších zdrojů stejnosměrného proudu.

V druhé polovině 18. století byla snaha o nalezení nového zdroje elektrické energie, který by nahradil tehdejší leydenskou láhev.

Prvotní impuls pro vznik elektrochemického článku pochází od italského experimentátora Luigi Giovanniho (1737–1798). Jeho slavný pokus s žabími stehýnkami zavěšenými na měděném háku, kdy při kontaktu s ocelovým skalpelem došlo ke stažení svalů, inspiroval vědce k dalšímu bádání. Na základě tohoto pokusu sestavil Alessandro Volta (1745–1798) první elektrochemický článek. V roce 1800 představil svůj „Voltův sloup“ s elektrodami tvořenými ze stříbra a zinku. Elektrolytem byl roztok chloridu sodného.

Do roku 1859 se jednalo pouze o články primární, u kterých nelze zvrátit směr chemické reakce. V tomto roce vědátor Gaston Planté sestavil historicky první olověný článek, který bylo možné opětovně nabít, což znamenalo další posun v elektrochemickém odvětví. Vznikl tak nový druh článku, dnes známý jako elektrický akumulátor.

Významné zlepšení vlastností akumulátorů nastalo při objevu alkalického akumulátoru na počátku 19. stol. Nezávisle na sobě došlo k objevu slavným Tomášem Edisonem a švédským vědcem Jan Waldemarem Jungerem. T. A. Edison původně použil jako elektrody tvořené ze železa a oxidu nikelnatého. Následným krokem byla náhrada železa za kadmium. Tento krok odstartoval výrobu nikl-kadmiových článků, které jsou využívány dodnes. Došlo k dalšímu kroku vpřed ve vývoji.

## 1. Elektrochemické články

S postupem času přicházely na svět další typy provedení, které obohatily svět. Dalším zlomovým bodem bylo jednoznačně příchod článků na bázi lithia, které svými parametry překonávají všechny dosud známá provedení. Dnes je využívána široká škála provedení, která se uplatňují dle svých význačností a parametrů. [1]

### 1.3 ZÁKLADNÍ POJMY

Každý elektrochemický článek je složen z kladné elektrody, záporné elektrody a elektrolytu. Toto aktivní část článků, díky kterým je zajištěn přenos elektrického proudu nosiči elektrického náboje (aniontů a kationtů). Pro funkčnost článku se používají další části jako nádoba, obal, separátor aj. Detailní specifikace článků bývají uvedeny v katalogu výrobku, který je vydáván výrobcem.

Separátor slouží k oddělení kladné a záporné elektrody a zároveň umožňuje průchod nosičů náboje.

Napětí článku je dáno rozdílem elektrochemických potenciálů. Ten je dán použitými aktivními materiály, zajišťující elektrochemickou přeměnu. Výsledné napětí článku je měřeno na svorkách článku. Toto napětí se mění v závislosti na stavu baterie a vnějšího okolí. Pro hlubší pochopení složitých elektrochemických dějů vhodná literatura [2], která je rozsáhlou sbírkou znalostí o elektrochemických článcích. Stručnějším popisem je diplomová práce vytvořena v rámci ČVUT FEL. [3]

Pro zkoumání elektrochemických zdrojů je nutno zmínit pár základních pojmů, které se obecně používají

#### 1.3.1 Kapacita akumulátoru $C_p$

Veličina udává velikost elektrického náboje, který je akumulátor schopen dodat při stanoveném napětí. S velikostí kapacity se udává i doba, s jakou se má článek vybíjet. (Značení viz kap.1.3.2) Tuto časovou závislost popisuje Peukertova rovnice, pro kterou platí:

$$C_p = I^k \cdot t \quad (1)$$

$C_p$  ... kapacita baterie při vybíjení [Ah]

$I$  ... požadovaný proud vybíjení [A]

$t$  ... doba vybíjení [hod]

$k$  ... Peukertova konstanta [-]

Konstanta  $k$  liší s typem článku. Pro olověnou baterii se koeficient pohybuje v rozmezí 1,1 až 1,3. [2]

Pro akumulátory založené na bázi lithia se konstanta oproti olověným akumulátorům více blíží k jedné. Tento poznatek souvisí s vyššími hodnotami účinností a možným vyšším stupněm vybití bez poškozujících účinků. [4]



### 1.3.2 Značení C

Jak již bylo naznačeno, jde o značení velikosti proudu, jakým článek vybíjen nebo nabíjen.

Příkladem může být hodnota 0,2C, která znamená vybíjení 0,2 x násobkem kapacity akumulátoru. Například u baterie s kapacitou 44 Ah bude vybíjecí proud 8,8 A.

Je možné se setkat se značením C<sub>10</sub>, které znamená velikost proudu, kterým lze článek vybíjet po dobu 10 h. U našeho příkladu 44 Ah bude vyvíjecí proud 4,4 A. [5]

### 1.3.3 Stav baterie „State of health“ (SOH)

Je definován jako poměr kapacity, kterou článek je schopný dodat ku jmenovité kapacitě stanovené výrobcem.

$$SOH = \frac{Q_{max}}{C_N} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

$Q_{max}$  ... maximální kapacita článku [Ah]

$C_N$  ... nominální kapacita dána výrobcem [Ah]

### 1.3.4 Stav nabití „State of charge“ (SOC)

Procentuální vyjádření dostupného náboje článku, vztaženého k jmenovité kapacitě stanovené výrobcem.

$$SOC = 1 - \frac{Q_{ve}}{C_N} \quad (3)$$

$Q_{ve}$  ... vlastní náboj [Ah]

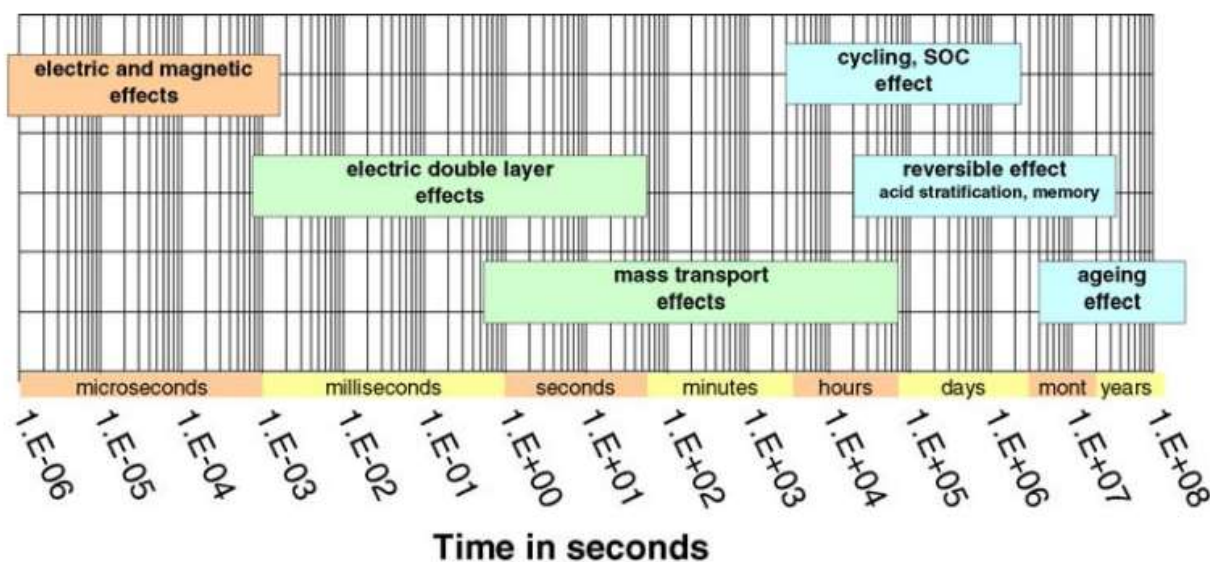
$C_N$  ... nominální kapacita dána výrobcem [Ah]

## 2 POPIS ČLÁNKŮ

### 2.1 DYNAMICKÉ SYSTÉMY

Pro správné pochopení chování elektrochemických zdrojů energie je důležitý přesný fyzikální popis chování elektrochemického děje. Samotný děj je složitým procesem, který lze vyjádřit jako lineární systém pouze ve velmi zjednodušených případech. Stupeň zjednodušení je závislý na míře dynamičnosti systému.

Pro statické systémy platí ustálený stav, při němž jsou vstupní veličiny konstantní. Vstupními veličinami rozumíme zejména okolní teplotu a elektrický proud. Ostatní veličiny jako napětí článku, SOC nebo teplota článku jsou již veličinami závislými. Tento případ nastává pouze sporadicky a je typický pro starší jednodušší systémy, které se s postupem času jeví jako nedostatečné.



Obr. 1: Dynamika procesů závislosti na čase [19] [3]

V této části práce budou popsány akumulátorové články ze dvou odlišných pohledů:

Jako první jde o modelování akumulátoru, který slouží pro co možná nepřesnější simulaci reálného článku.

Druhým pohledem je fyzikální popis, který se pokusí osvětlit elektrochemické chování v akumulátoru.

## 2.2 MODELOVÁNÍ BATERIE

Jak bylo řečeno pro přesnější popis, je nutné uvažovat baterii jako nelineární systém, jež můžeme rozdělit do tří různých modelů.

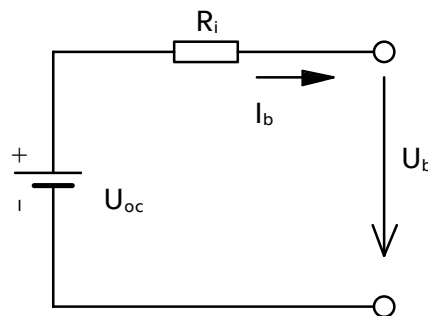
Zjednodušený **elektrochemický model** založený na popisu veškerých chemických reakcí v baterii. Je nutné znát vlastnosti použitých materiálů.

**Matematický model** je velmi přesnou metodou simulace. Přesnost je dosažena empirickým přístupem. Tedy je nutné zavedení mnoha vstupních proměnných a dalších konstant, jež je potřeba stanovit prostřednictvím měření na určitém vzorku. Tato metoda je časově velmi náročná, drahá a také obtížná.

Třetím přístupem je nahrazení reálného článku **náhradním obvodovým schématem** na základě dynamických procesů a fyzikálních jevů, odehrávající se v baterii. Náhradní obvodové schéma je složeno ze základních běžně používaných obvodových prvků (rezistor, kapacitor nebo zdroj napětí). S výše zmíněnou mírou dynamičnosti je nutno zvýšit také přesnost popisu pomocí náhradního schématu. [4] [6] [7]

### 2.2.1 Rint (IR) model

Obvodové náhradní schéma je nejjednodušším základním modelem. Nevystihuje téměř žádnou dynamiku systému. Schéma je složeno ze zdroje napětí odpovídající napětí naprázdno  $U_{oc}$  a vnitřního odporu článku  $R_i$ . Oba parametry jsou závislé na stavu SoC, SoH a teplotě. Schéma je možné použít v případě ustálených stavů, například při připojení konstantní zátěže.



Obr. 2: Schéma IR modelu

$U_{oc}$  ... (Open Circuit) napětí naprázdno

$R_i$  ... vnitřní odpor článku

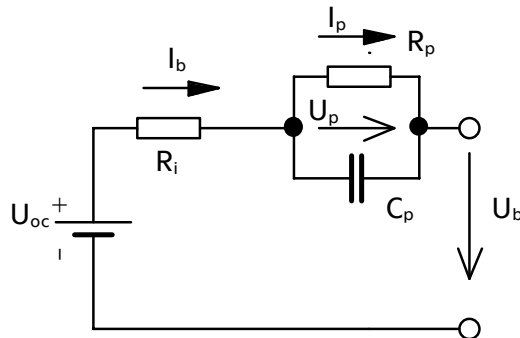
Platí obvodová rovnice:

$$U_b = U_{oc} - I_b R_i \quad (4)$$

[4] [7] [8] [9]

### 2.2.2 Theveninův (Rádlesův) model

Obvod je složen ze tří základních částí. Napětí naprázdno  $U_{oc}$ , vnitřní odpor  $R_i$  reprezentující odpor elektrolytu a elektrod a jako třetí část  $R||C$  větev. Tato část obvodu představuje dynamické chování obvodu. Odpor  $R_p$  a kapacitance  $C_p$  zastupuje polarizační děje uskutečněné ve článku.



Obr. 3 Theveninův náhradní obvod

$U_{oc}$  ... (Open Circuit) napětí naprázdno

$R_i$  ... vnitřní odpor článku

$R_p$  ... polarizační odpor

$C_p$  ... polarizační kapacitance

Platí obvodové rovnice:

$$\dot{U} = -\frac{U_p}{R_p \cdot C_p} + \frac{I_p}{C_p} \quad (5)$$

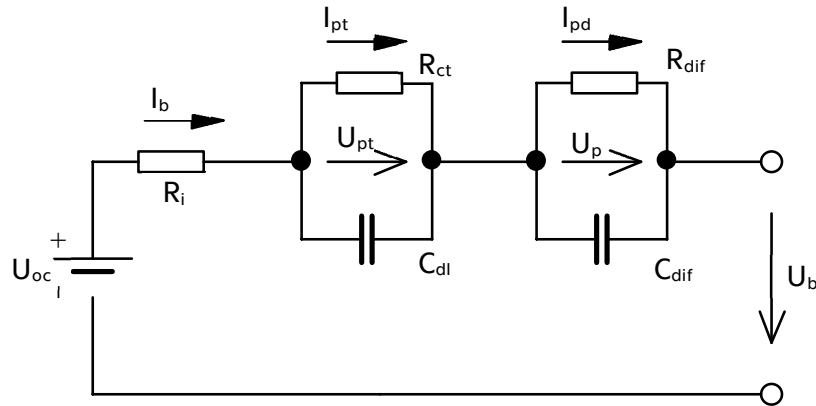
$$U_b = U_{oc} - U_p - I_b \cdot R_i$$

[7] [9]

### 2.2.3 DP (Dual Polarization) model

Popis pomocí tohoto modelu odpovídá více fyzikální podstatě chování článku. Oproti matematickému modelu, který není podložen jakýmkoli fyzikálními zákony, nebo jejím chováním a je čistě matematickým popisem.

Tento model jednoduše popisuje chování článku při zachování přesnosti a použitelnosti. Jak je možno, vidět jde o „vylepšený“ Theveninův model. Rozdílnost mezi koncentrační (difúzní) polarizací a aktivační (elektrochemickou) polarizací vede k nepřesnostem na konci nabíjecího a vybíjecího cyklu. Rozlišením těchto dvou jevů dosáhneme vyšší dynamické přesnosti.



Obr. 4: Dual Polarization model (DP model)

$U_{oc}$  ... (Open Circuit) napětí naprázdno  
 $R_i$  ... (Internal Resistance) vnitřní odpor  
 $R_{ct}$  ... (Charge – Transfer Resistance)  
 $C_{dl}$  ... (Double – Layer Capacity)  
 $R_{diff}$  ... (Diffusion Resistance)  
 $C_{diff}$  ... (Diffusion Capacity)  
 $I_{pt}, U_{pt}$  ... (Transfe polarization)  
 $I_{pd}, U_{pd}$  ... (Diffusion polarization)

Pro obvodové rovnice platí:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{pt} &= -\frac{U_{pt}}{R_{ct} \cdot C_{pt}} + \frac{I_b}{C_{pt}} & (6) \\ \dot{U}_{pd} &= \frac{U_{pd}}{R_{diff} \cdot C_{diff}} + \frac{I_b}{C_{diff}} \\ U_b &= U_{oc} - U_{pt} - U_{pd} - I_b \cdot R_i \end{aligned}$$

Jak bylo zmíněno, jde o „sofistikovanější“ verzi Theveninova modelu. Opět platí stejné parametry napětí naprázdno  $U_{oc}$  a vnitřního odporu. Části R||C odlišují koncentrační a aktivační polarizaci.

Aktivační polarizace je rozdělena na:

- $R_{ct}$ : Energetické ztráty způsobené chemickou reakcí.
- $C_{dl}$ : Vytvoření kapacitní dvojvrstvy na povrchu elektrody a elektrolytu, tato dvojvrstva ovlivňuje dynamiku procesů.

Difúzní polarizace je rozdělena na:

- $R_{diff}$ : Energetické ztráty způsobené difúzní migrací nábojů.
- $C_{diff}$ : Představuje dynamiku difúzního procesu.

*Poznámka: Difúzní procesy jsou značně závislé na teplotě.*

## 2. Popis článků

Stanovení náhradních parametrů akumulátoru je detailněji popsáno v literatuře [10]. Je zde popsán algoritmus pro jejich stanovení, který je založen na frekvenční závislosti jednotlivých součástí. Dále je využito Fourierových transformací za využití matematických funkcí programu Matlab.

Parametry byly měřeny pro přesněji nespecifikovaný typ Li-Ion článku s nominálním napětím 3,75 V (SOH = 100%)

Parametry náhradního schématu	SOC = 50 %	SOC = 99 %
$R_i$ [m $\Omega$ ]	46,00	2,40
$R_{ct}$ [m $\Omega$ ]	24,40	3,40
$C_{dl}$ [F]	483,5	945,21
$R_{diff}$ [m $\Omega$ ]	22,3	6,30
$C_{diff}$ [kF]	27,78	15,69
$\tau_{dl}$ [min]	2	0,054 (3,24s)
$\tau_{diff}$ [min]	10	1,65

Tab. 1: Číselné hodnoty náhradního schématu  
Převzato z [10]

[2] [7] [3] [10]

## 3 ÚČINNOST NABÍJENÍ/VYBÍJENÍ

Pojem účinnost sekundárních článků lze definovat jako poměr výstupní hodnoty článku během vybíjení ku vstupní hodnotě, která je potřebná k uvedení článku do původního stavu. Účinnosti lze rozdělit na:

- napětovou účinnost,
- ampérhodinová účinnost,
- energetická účinnost,

Pokud zmíníme pojem účinnost je často myšlena energetická účinnost či ampérhodinová (coulumbická).

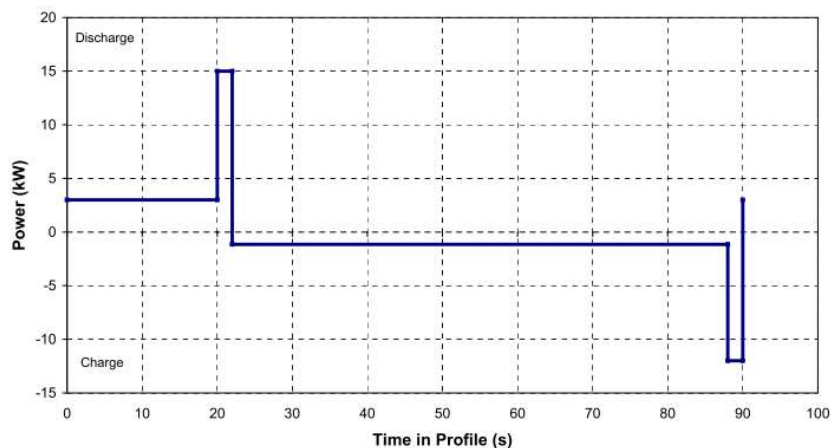
Na energetickou účinnost článků lze pohlížet ze tří pohledů.  
Účinnost:

- nabíjecího cyklu,
- vybíjecího cyklu,
- celého cyklu nabití i vybití.

Hlavním faktorem těchto účinností je stanovení energie, uložené ve formě chemické. Časové konstanty DP modelu napovídají o době průběhu chemických dějů. Pokud tedy zkoumáme uloženou chemickou energii, budeme se zajímat o ustálený případ, který se projeví konstantní hodnotou napětí naprázdno.

Množství uložené elektrické energie v chemické formě je možno stanovit ze závislosti ustáleného napětí naprázdno  $U_{oc}$  na SOC. Vzhledem k časovým konstantám tento způsob měření by byl časově velmi náročný, a tudíž nepřijatelný. Je nutno se poohlédnout po dalších metodách měření.

V literatuře [11] vydaný institucí *U.S. Department of Energy* byl postup měření popsán pouze pro měření účinnosti vybíjecího cyklu. Pomocí pulzní metody, kdy během nabíjení dochází k nabíjecímu a vybíjecímu pulzu s definovanými parametry.



Obr. 6: Pulsní metoda pro stanovení účinnosti [11]

### 3. Účinnost nabíjení/vybíjení

Americká instituce popisuje účinnost jako poměr energie nabíjecího pulzu ku pulzu vybíjecímu.

$$\eta_{rt} = \frac{E_{nab}}{E_{vrácena}} \quad (7)$$

$\eta_{rt}$  ... *Round trip efficiency*

Metoda není vhodná ze dvou důvodů:

1. Metodou nelze určit účinnost nabíjecího režimu.
2. Energie „vrácená“ baterii není rovna uložené chemické energii z důvod vlivu polarizačních procesů.

## 3.1 ENERGIE VE FORMĚ CHEMICKÉ (VLASTNÍ ENERGIE)

Jak bylo zmíněno přeměna elektrické energie na formu chemickou není bezetrátová. Navíc k přeměně nedochází okamžitě a je doprovázena s časovou konstantou.

Volnou energii ve článku možno popsat *Gibbsovou volnou energií* [2] [3]. V literatuře [12] je energie popsána jako:

$$|\Delta G| = \text{prošlý náboj rozdíl} \cdot \text{vratného potenciálu} \quad (8)$$

Při další úvaze volná energie je nahrazena vlastní energií, při níž uvažujeme *rozdíl vratného potenciálu* jako konstantu. Konstanta je specifická pro každý článek. Tato konstanta je nahrazena velikostí napětí naprázdno  $U_{oc}$ .

Změnou SOC se mění vnitřní stav akumulátoru a dochází ke změně  $U_{oc}$ . Změna vlastní energie  $\Delta E_{ve}$  je dán vztahem:

$$\Delta E_{ve} = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_{oc}(SOC) \cdot C_n \cdot dSOC \quad (9)$$

$$SOC(t) = SOC(0) + \frac{\int Idt}{C_n} \quad (10)$$

$SOC(0)$  ... počáteční stav nabíjení [–]

$SOC(t)$  ... konečný stav nabíjení [–]

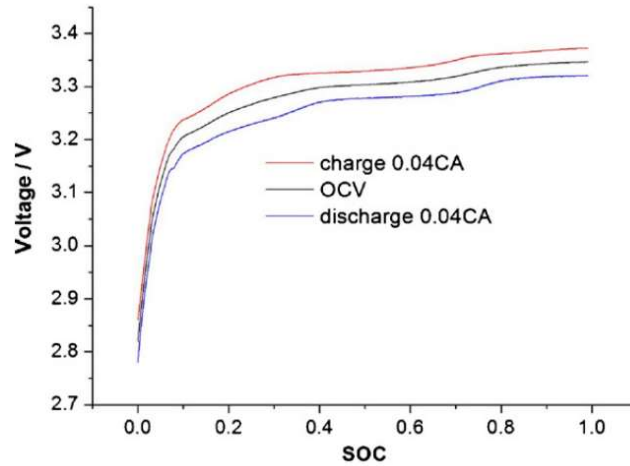
$C_n$  ... celková kapacita stanovena měřením [Ah]

(nemusí odpovídat parametrům výrobce)

Pro měření křivky  $U_{oc}(SOC)$  možno použít několika metod. [12] [13].

1. Pro dané body na křivce SOC je měřeno napětí naprázdno  $U_{oc}$  po ustálení.  
Napětí  
bývá ustáleno nejméně po hodině. Metoda je časově náročná.
2. Baterie je nabita proudem 0,33C. Následně je nabita a vybita nízkým proudem 0,04C v plném kapacitním rozsahu. Křivka  $U_{oc}(SOC)$  je dána jejími průměry.



Obr. 7: Křivky pro stanovení  $U_{oc}(SOC)$  [12]

3. Další metoda je podobná předchozímu postupu, avšak je využito pulzního nabíjení/ vybíjení. Detailnější popis je k dispozici zde v literatuře [13]

### 3.2 ÚČINNOST NABÍJENÍ $\eta_{nab}$

Pro stanovení účinnosti nabíjení platí:

$$\eta_{nab} = \frac{\Delta E_{ve}}{E_{in}} \quad (11)$$

$$E_{in} = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_{nab}(SOC) \cdot C_n \cdot dSOC \quad (12)$$

### 3.3 ÚČINNOST VYBÍJENÍ $\eta_{vyb}$

Pro stanovení účinnosti vybíjení platí:

$$\eta_{vyb} = \frac{E_{out}}{\Delta E_{ve}} \quad (13)$$

$$E_{out} = \int_{SOC(0)}^{SOC(t)} U_{vyb}(SOC) \cdot C_n \cdot dSOC \quad (14)$$

### 3.4 ÚČINNOST NABÍJENÍ/VYBÍJENÍ

Pro stanovení účinnosti nabití/vybití platí:

$$\eta_{bat} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (15)$$

\*Musí být splněna podmínka konstantní teploty a proudu v průběhu měření.  
[12]

## 4 PŘESNOST MĚŘENÍ

---

### 4.1 ZÁSADY MĚŘENÍ

Užívané zdroje pro tuto práci jsou mnohdy v anglickém jazyce, protože dosud není používán ekvivalent českého slova. Co se týče metody určení účinnosti cyklů, je používán termín „coulombic efficiency“. Pokud jde o metodu přesného měření prošlého náboje, je používán termín „coulometry“. V českých textech se tyto výrazy také používají ve tvarech coulombická či coulometrie.

Pro měření účinnosti článků je důležité dodržet určité zásady pro přesné měření náboje. O této problematice pojednává velmi rozsáhle a podrobně literatura [14] s názvem „A HIGH PRECISION STUDY OF LI-ION BATTERIES“, dále jsou řešeny další aspekty diagnostiky, zejména články na bázi Lithia.

Pro přiblížení ve 4. kapitole je pojednáno o přesném coulometrickém měření nabíjecího, či vybíjecího cyklu. Se zvyšováním účinnosti Li-Ion akumulátorů, blížící se k hranici 100 %, narůstá požadavek přesnosti měření. Autor má za cíl být schopen změřit článek, který dosahuje účinnosti 99,99 % s opakovatelností 3000 cyklů. Cílená přesnost je alespoň 0,01 %. Autor řeší jednotlivé přesnosti měření. Nezabývá se nejistotami měření.

Hlavní zásady pro dosažení vysoké přesnosti jsou:

- Protékající proud během nabíjecího a vybíjecího cyklu je dostatečně přesný a stabilní.
- Měřené napětí na článku je dostatečně přesné.
- Teplota článku je udržována konstantní.
- Perioda měření je co nejkratší.

Důsledky těchto zásad pro měřící přístroje jsou:

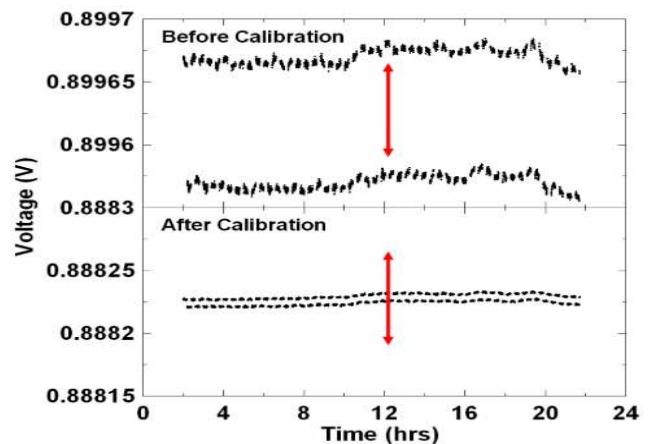
- Chyba dodaného proudu od zdroje a zátěže.
- Chyba měřeného napětí multimetru pro přesné ukončení cyklů.
- Nutná regulace teploty ve speciálně vybavených komorách.
- Perioda měření, kdy je nutné přesně indikovat okamžik ukončení cyklu s prahovým napětím.

**Stabilita proudu**

Řešením je volba dostatečně přesného přístroje. Důležitým aspektem je jeho kalibrace.

**Měření napětí**

Kromě již zmíněných zásad je důležité využití 4-bodové měřicí metody.



Obr. 8 Příklad vlivu kalibrace na přístroj [14]

**4.2 NEJISTOTY MĚŘENÍ**

Měření nemůže být dokonale přesné, vždy dochází k zatížení chybou, kterou lze pouze minimalizovat. V metrologii je snaha formulovat výsledek jako:

- odhad skutečné hodnoty  $\pm$  nejistota měření

Pokud určujeme nejistotu měření, nebereme v úvahu *hrubé* chyby, které jsou způsobeny často lidským faktorem, jako například nesprávné použití přístroje.

Chyby dále dělíme dle výskytu. V průběhu měření se mohou objevit chyby náhodného charakteru nebo chyby systematické. Proto nejistoty měření rozlišujeme na nejistoty *typu A* a *typu B*.

**Nejistota typu A**

Jedná se o náhodné chyby, které při totožném opakování měření mají odlišný výstup. Měření typu A využívá matematickou statistiku. Nejčastěji vycházíme z aritmetického průměru a jeho směrodatné odchylky.

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (16)$$

$u_A$  ... standartní nejistota typu A

$x_i$  ...  $i$  – té měření

$\bar{x}$  ... aritmetický průměr

$N$  ... počet měření

#### 4. Přesnost měření

##### **Nejistota typu B – číslicového přístroje**

Nejistota typu B zahrnuje chyby, které nejsou dány závisle na počtu měření a nelze je zařadit mezi statistické výpočty. Nejistoty jsou často dány měřicí chybou přístrojů. Vycházíme ze specifikací dané výrobcem. Pro číslicový multimetr platí:

$$u_B = \frac{\frac{\delta_1}{100}X + \frac{\delta_2}{100}M}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

$u_B$  ... standardní nejistota typu B

$X$  ... hodnota údaje

$M$  ... použitý rozsah

$\delta_1$  ... chyba z odečtené hodnoty

$\delta_2$  ... chyba z rozsahu

Existují další způsoby popisu viz. [15]

##### **Kombinovaná standardní nejistota**

Kombinovaná standardní nejistota je dána geometrickým součtem  $u_a$  a  $u_b$ .

$$u_c = \sqrt{(u_a)^2 + (u_b)^2} \quad (18)$$

##### **Nejistota nepřímého měření**

Pokud je výsledná veličina funkcí více veličin, určíme nejistotu nepřímého měření dle vztahu:

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot u_{xi} \right)^2} \quad (19)$$

[15]

## 5 REALIZACE:

# STANICE AUTOMATICKÉHO MĚŘENÍ: „S.A.M“

---

### 5.1 Úvod

Laboratoř elektrochemický zdrojů na katedře elektrotechnologie (LFSEZ) disponuje širokým rozsahem měřících přístrojů, které byly zakoupeny nebo vytvořeny v rámci akademické práce, nebo v rámci výzkumu přímo v laboratoři. Mnoho těchto zařízení je schopno nějakým způsobem komunikovat s programem LabVIEW.

V laboratoři dosud chybí sjednocený systém, který by poskytl možnou kombinaci přístrojů pro další účely měření a jejich jednoduchou implementaci pro potřeby měření. Pokud by se podařilo vytvořit takovýto systém, mohl by dojít k efektivnějšímu využití laboratorních zařízení, které by byly dále rozvíjeny v rámci celého pracoviště.

Vznik testovacích stanic byl již na katedře několikrát realizován v rámci akademických prací. Mým cílem je vytvořit takový systém, který je možno dále rozvíjet s příchodem, jak nových a kvalitnějších přístrojů, tak dalších projektů, kterým by program zjednodušil práci.

Pro tento účel jsem si zapsal předmět *Grafické programování* (kód předmětu: AOB38GRP) na katedře měření. Předmět je zaměřen na správnou implementaci a vývoj aplikačních programů pomocí grafického vývojového prostředí LabVIEW. Program je zaměřen zejména na automatizované a měřící systémy. Po úspěšném zakončení zkoušky je studentovi udělen certifikát CLAD (Certified LabVIEW Associate Developer), udělený společností National Instruments.

Záměrem bylo v první fázi vytvořit kostru programu, která by byla schopná jednoduchého využití měřících zařízení při možnosti opakovaného cyklování elektrochemických článků. V průběhu realizace byla snaha dodržet tyto body:

- modularita pracoviště,
- jednoduchost systému,
- aplikovatelnost dalších měřících metod,
- automatizace.

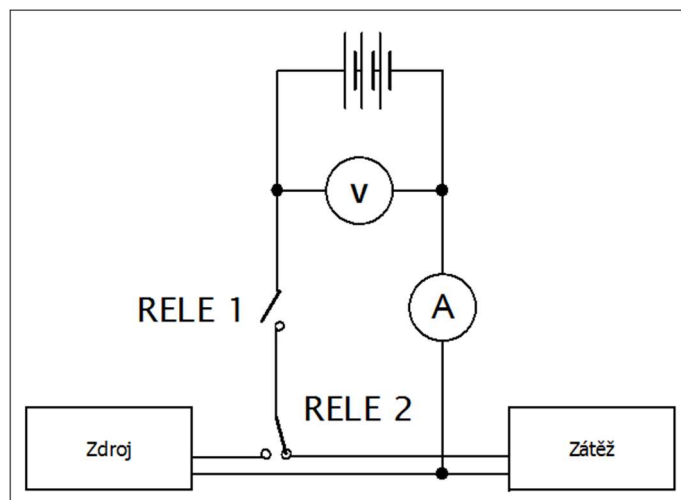
Ve druhém kroku jsem program dále upravoval a vylepšoval. V rámci této fáze jsem pokračoval v další modifikaci pro snadnější implementaci potenciálních změn. Tento krok byl proveden ve dvou stupních, které budou dále popsány.

Výstupním programem je pracoviště, schopné automatizovaného měření účinnosti nabíjecího-vybíjecího procesu akumulátorových článků. Následující část bude považována také jako dokumentace.

5. Realizace:  
 Stanice automatického měření: „S.A.M“

## 5.2 ZÁKLADNÍ KONCEPT (S.A.M-1)

K realizaci byla dostupná zátěž a zdroj, se kterými není možná komunikace, proto je nutný manuální zásah uživatele. Dále byly k dispozici dvě elektromagnetická relé. S touto sestavou vznikl základní koncept zapojení na obrázku.



Obr. 9: Základní koncept stanice

Přístroje byly vybaveny následujícími parametry.

### 5.2.1 Zátěž – GW Instek PEL-300

Základní parametry:

- Napěťový rozsah: 3–60 V
- Proudový rozsah: 6 mA–60 A
- Výkonový rozsah: 1–300 W

Tab. 2 Údaje přesnosti pro zátěž GW Instek PEL-300

Režim	Rozsah	Přesnost	Rozlišení
Konstantní napětí (CV mode)	3 ~ 60 V	$\pm (0.1 \% + 40\text{mV})$	20 mV
Konstantní proud (CC mode)	6 A ~ 60 A	$\pm (0.5 \% + 100 \text{ mA})$	20 mA
	0.6 A ~ 6 A	$\pm (0.1 \% + 10 \text{ mA})$	2 mA
	6 mA ~ 0.6 A	$\pm (0.1 \% + 1 \text{ mA})$	0.2 mA

### 5.2.2 Zdroj- Zhaoxin RXN-3020D

Základní parametry:

- Napěťový rozsah: 0–60 V
- Proudový rozsah: 0–20 A

Tab. 3 Údaje přesnosti pro zdroj Zhaoxin RXN-3020D

Režim	Stabilita napájení	Stabilita zátěže	Šum (RMS)
Konstantní napětí (CV mode)	$\pm (0.01\% + 2) \text{ mV}$	$\pm (0.01\% + 2) \text{ mV}$	$\pm 1 \text{ mV}$
Konstantní proud (CC mode)	$\pm (0.1\% + 3) \text{ mA}$	$\pm (0.2\% + 3) \text{ mA}$	$\pm 2 \text{ mA}$

### 5.2.3 Relé – Rayex electronic AM3 12P

Základní parametry:

- Maximální proud: 60A/80A
- Jmenovitá hodnota napájení: 12 V
- Izolační odpor: 100 MΩ Min. (DC 500 V)
- Kontaktní odpor: 50 mΩ (max.)
- Časová odezva zap/vyp: 7 ms/5 ms (max.)

Relé bylo napájeno z regulovatelného zdroje Diametral R124R50E 0,9 ÷ 24V/2A.

### 5.2.4 Proudová sonda – LEM HAIS 50-P

Pro měření proudu byla zvolena sonda LEM HAIS 50-P. Sonda pracuje na principu Hallova jevu. Výhodou je galvanické oddělení měřeného objektu od měřícího obvodu. Sonda měla již zabudované zesílení (2x) a vlastní síťové napájení. Při každém měření je nutná kalibrace offsetu  $U_{OE}$ .

Základní parametry:

- Proudový rozsah:  $\pm 150 \text{ A}$
- Převodní konstanta: 12,5 mV/ 1 A
- Výstupní napětí:  $U_{OE} \pm (0.625 \cdot I_P / I_{PN}) \text{ V}$

### 5.2.5 Teplotní čidla

Jako senzor teploty byl zvolen odporový teploměr polovodičového typu s využitím operačního zesilovače. Převodník odpor -> napětí. Připojena byla dvě čidla pro stanovení teploty prostředí a teploty článku. Zařízení mělo opět vlastní síťové napájení.

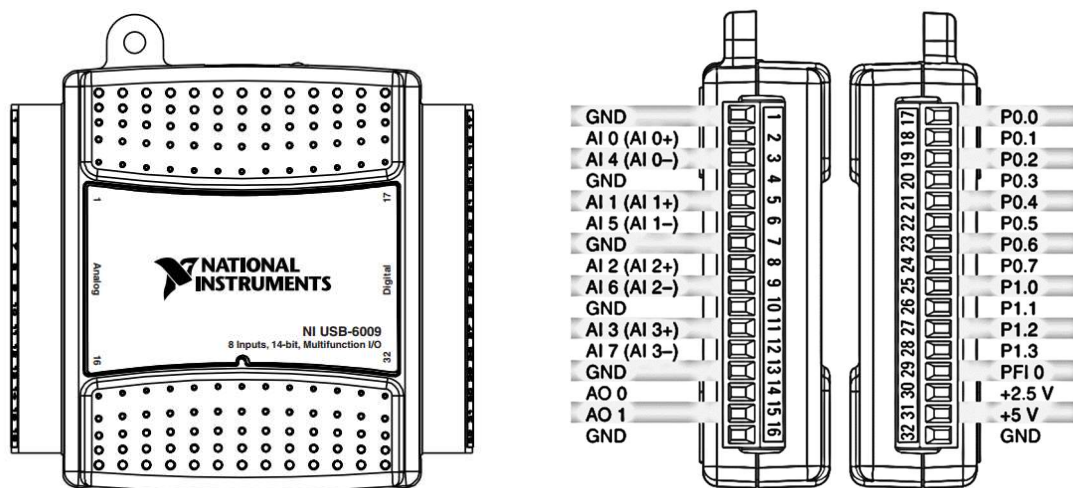
Základní parametry:

- Převodní vztah: 10 °C/V
- Výstup: 0-10 V
- Senzory: Tk1, Tk2

### 5.2.6 Řídící jednotka

Pro snadnou implementaci a vytvoření systému byla zvolena řídící jednotka NI USB 6009 od firmy National Instruments, která je přímo určena pro účely programování v grafickém prostředí LabVIEW. Program obsahuje knihovny plně kompatibilní se řídící jednotkou. [16]

5. Realizace:  
Stanice automatického měření: „S.A.M“



Obr. 10: NI USB-6009

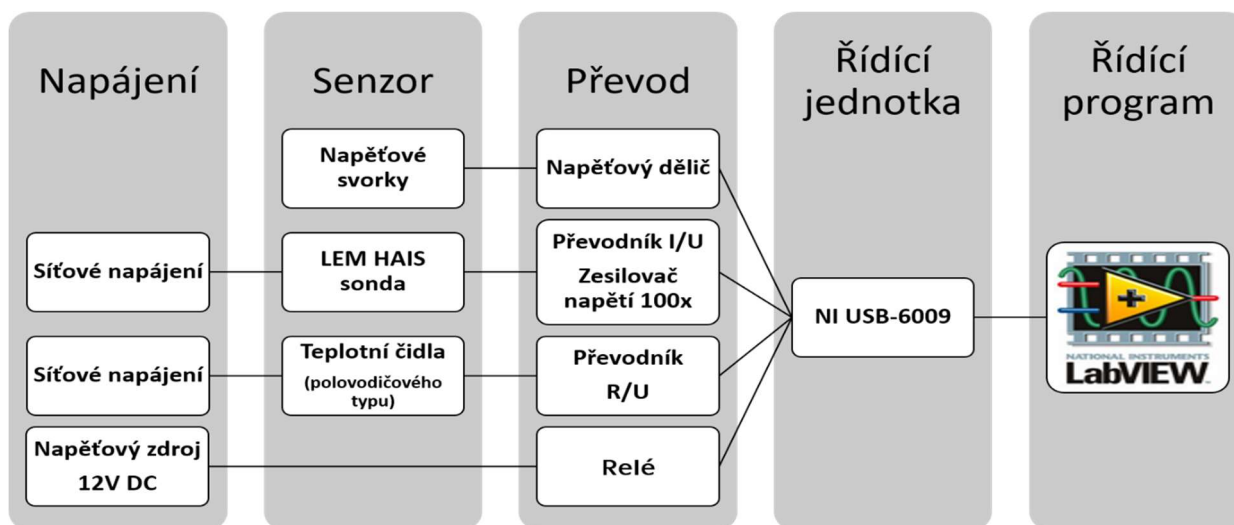
Parametry jednotky:

- analogové vstupy (AI): 8x
- analogové výstupy (AO): 2x
- digitální I/O (DIO): 12x
- čítač: 32-bitový
- A/D převodník: 14-bitový
- Maximální vzorkovací kmitočet analogových vstupů (AI) : 48 kS/s

### 5.2.7 Shrnutí

Z těchto přístrojů byla vytvořena první sestava schopná měření základních parametrů elektrochemických článků. Veličiny byly převedeny na napětí  $\pm 10$  V, které bylo možné snímat pomocí řídicí jednotky NI USB-6009.

Výraznou nevýhodou mnoha nezávislých zařízení byla nutnost pěti napájecích zásuvek. Dále bylo použito zbytečné množství napěťových děličů a operačních zesilovačů.



Obr. 11 Diagram zapojení základního konceptu

\*Grafická dokumentace viz. Příloha A



## 5.3 PROGRAMOVÁ ČÁST

### 5.3.1 Úvod

Po úspěšném absolvování předmětu *Grafického programování* bylo možné pracovat na systému pro automatické měření. Je nutné zmínit, že programování v LabVIEW není obtížné. Již úplný začátečník je schopný s programem pracovat. Není však zaručeno správné používání programových funkcí, které jsou v průběhu jednoho semestru rozebírány. U začátečníků se objevují typické chyby z neznalosti, které vedou například k tomu, že program je pouze jednoúčelový, či další změny v něm jsou náročné. Předmět upozorňuje na případné chyby. Jsou probírána doporučení, která dokáží vylepšit chod programu. Pro špatně využitelné programy je zde v předmětu věnována část tzv. „Refractoringu“, kde jsou ukázány příklady oprav při zachování funkčnosti.

Kurz, který byl zapsán v rámci individuálního projektu, je zaměřen z velké části na správné zacházení s vlastnostmi a funkcemi, které dokáží zefektivnit chod programu. Pokud by došlo k dalšímu rozvoji systému (např. v rámci diplomové práce), bylo by vhodné absolvování dalšího stupně certifikace (CLD). Viz. [16]

Program nabízí již předem připravené šablony, jež lze použít pro tvorbu programu. Pro měřicí stanici se nabízí stavový automat, nebo obslužný program zpráv ve frontě.

Využití fronty zajišťuje výhodu v zajištění posloupnosti vykonaných procesů bez rizika ztráty dat. Při této volbě by došlo ke značnému zvýšení složitosti programu. Vzhledem k časovým intervalům měření, které se pohybují od jednotek sekund a dosud nedostatečným osobním zkušenostem s grafickým programováním, jsem zvolil formu klasického stavového automatu. Při periodách měření v rámci sekund nehrozí vysoké riziko ztráty informací. \*

\*Podrobnější informace lze nalézt v nápovědě programu.

### 5.3.2 Stavový automat

Mírným omezením je použití řízeného zdroje a zátěže, které nejsou schopné komunikovat přes jakékoli rozhraní a je nutný manuální zásah. Tato nedokonalost je důvodem hned několika nedostatků.

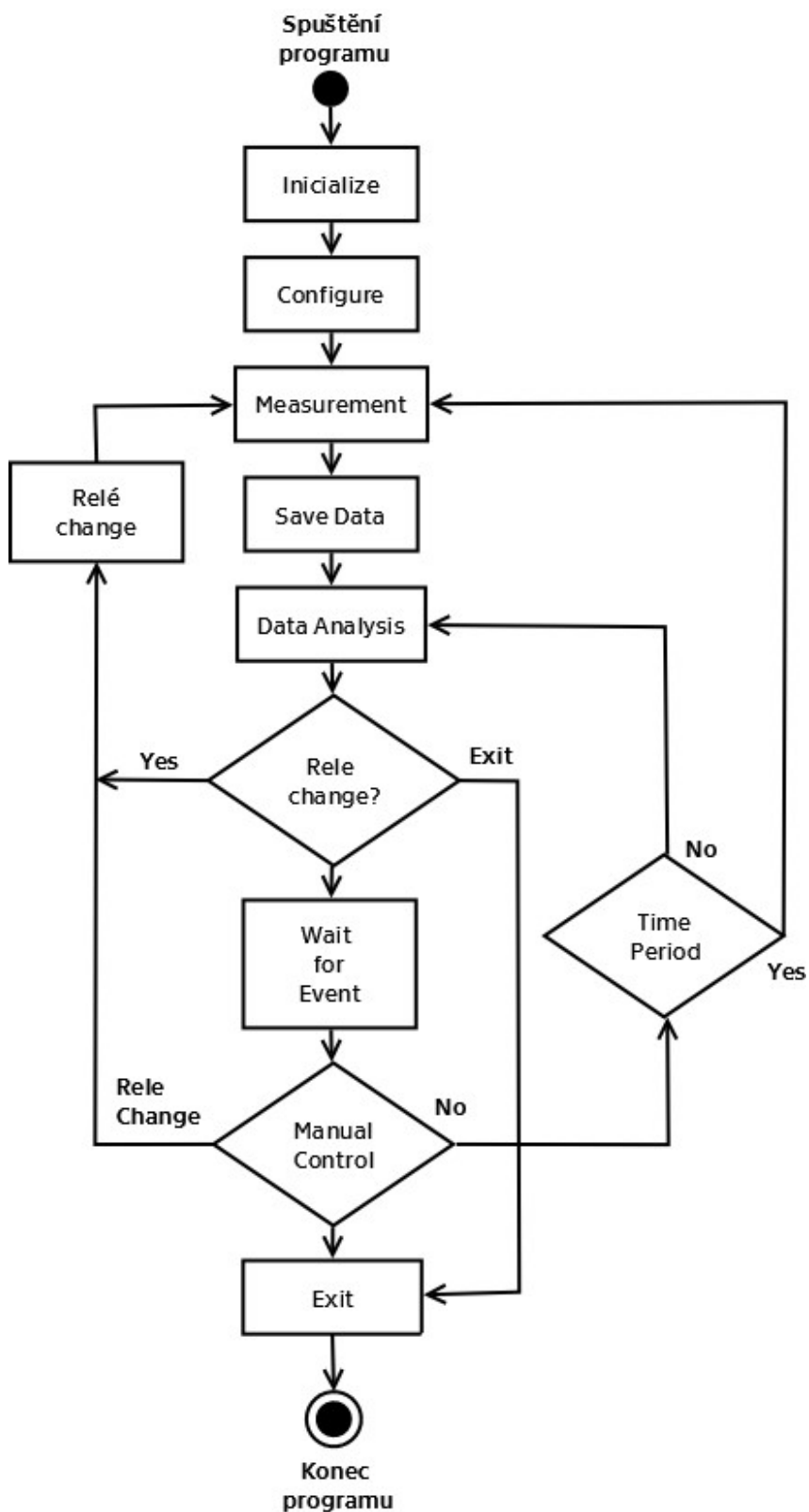
Hlavními důvody jsou:

- I. Na počátku měření je nutné manuálně nastavit zdroji/zátěži měřící parametry.
  - a. velikost nabíjecího proudu
  - b. velikost vybíjecího proudu
  - c. maximální povolené napětí akumulátoru
  
- II. Není možné měření účinnosti pouze nabíjecího či vybíjecího cyklu dle teoretické části 3.1., *metoda měření č. 2., pokud nedojde k manuálnímu zásahu operátora*. Pro stanovení závislosti  $U_{oc}$  (SOC) (viz 3.1) je nutné nejdříve cyklování při nízkém nabíjecím/vybíjecím proudu a následné měření dle vybraných parametrů. Dalším problémem je stanovení aktuální kapacity akumulátoru  $C_n$  dle 1.3.1, které je při manuálním měření časově náročné o to více s přihlédnutím na nutnost opakovatelnosti měření. Popis v teoretické části není tedy možné realizovat v plné míře.

Provedení teoretické části je prozatím provedeno částečně. V současnosti se již počítá s dokonalejšími a „chytřejšími“ přístroji. Další vývoj systému je tedy reálný v rámci diplomové práce.

Základní stavy automatu definují hlavní úkony programu, které musí program zajistit. Jednotlivé části budou následně stručně popsány. Detailnější informace jsou k dispozici v nápovědě programu LabVIEW. Není nutné jim věnovat další pozornost. Každé vytvořené „subVI“ obsahuje autorem dokumentovaný popis funkcí v anglickém jazyce.

Program je vybaven správou chyb (tzv. „error handler“), v případě výskytu chyby je nahlášena uživateli. Nabízí se možnost vytvoření stavu pro správu jednotlivých chyb. Při běhu programu nebyly zaznamenány závažné chyby, které by musely být takto řešeny.



Obr. 12 Hlavní stavový diagram programu

5. Realizace:

Stanice automatického měření: „S.A.M“

Snažil jsem se o zachování modularity. Tedy jednotlivé funkce slouží pro univerzální použití. Přesné provedení lze nalézt přímo v programu i s popisem v nápovědě. Univerzálnost se potvrdila při uplatnění vylepšené verze S.A.M-2, kde zůstaly zachovány jednotlivé funkce, které byly pouze poupraveny.

Následně budou stručně popsány jednotlivé stavy automatu a jejich funkce.

### **Inicialize**

Jde o počáteční stav spouštějící prvotní operace.

- Zahájení komunikace s jednotlivými přístroji a jejich konfiguraci pro měření. Pro snížení nejistoty měření typu A je snímáno více hodnot v jeden časový okamžik měření.
- Přejít do stavu *vypnuto*.
- Zkušební čtení hodnot, případné uložení offsetu.

### **Configure**

- Nastavení vstupních/ výstupních veličin.
  1. Vytvoření zapisovacích souborů.
  2. Nastavení grafů.
  3. Konfigurace vstupních veličin.
    - Při spuštění vyskočí ikona s nastavením parametrů akumulátoru.

\*Obrázek: viz. Příloha B.1

### **Relé change**

- Změna stavů (*nabíjení, vybíjení, vypnuto*).

### **Measurement**

- Snímání měřených hodnot.
- Konverze dat pro možný přepočet.

Při každém měření dochází ke snímání deseti hodnot, které jsou vyhodnoceny jako aritmetický průměr z nich.

### **Save Data**

- Ukládání je zajištěno do souborů s koncovkou .csv („Comma-separated values“) Jako oddělovací znak je použit středník (;). Pro každý cyklus je vytvořen nový soubor, do kterého jsou data ukládána. Na konci cyklu je proveden výpočet, který je zapsán na konec tabulky dat. Program vytvoří dva základní typy souborů
  1. Soubory pro jednotlivé cykly
    - *Název: 0.-číslo měření-. -typ měření – Measurement*
    - *Vzor: 0.1.LoadMeasurement*
    - *Hlavička*

V hlavičce tabulky jsou dvě kolonky *Time*. Čas je uveden v sekundách od začátku měření a ve formátu [HH:MM:SS].

*Uvedení časové informace v sekundách i ve formátu [HH:MM: SS] poskytuje zlepšení orientace a eliminaci nejasností při časovém přechodu o půlnoci.*

\*Stavový diagram pro soubory: viz. Příloha 0

2. Soubor se souhrnnými výsledky a vyhodnocením
  - Název: „Efficiency test results“

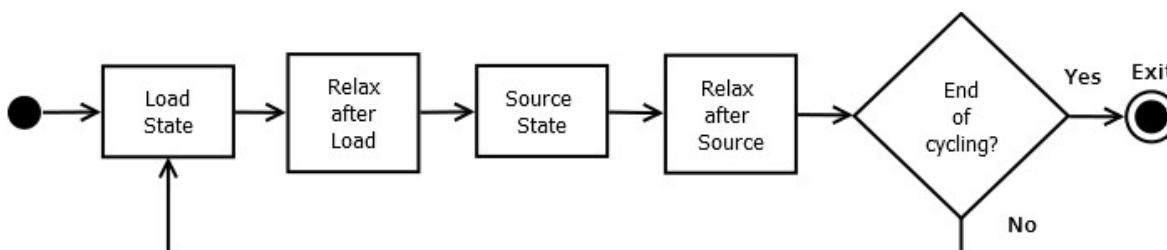
\*Obrázek: viz Příloha B.2.1

### **Data Analysis**

Tento stav je stěžejní částí programu, která rozhoduje o podmínkách přechodu pro stavy v *Rele change*.

Při dosažení maximální povolené teploty článku dojde k odpojení zdroje/zátěže a celkovému ukončení programu. Pokud je teplota udržena v mezních hodnotách, akumulátor je plynule cyklován dle zvolených parametrů dle Obr. 13 (Přechody stavů pro *Rele change*) K ukončení dojde po dosažení definovaného počtu cyklů a po následném plném nabití akumulátoru. Poslední vytvořený soubor je označen jako „*Last*“.

Úplný vývojový diagram je přiložen v příloze 0., který je doplněn o podmínky přechodů do dalšího stavu. Hodnota *Cut-Off Voltage* je minimálním napětím udávaná výrobcem, při kterém by mělo být vybíjení ukončeno. *Cut-Off Current* je násobkem jmenovité kapacity článku, která ukončuje nabíjecí proces. Výchozí hodnotou je 0,02C. Dále je určena perioda relaxace.



Obr. 13 Přechody stavů pro *Rele change*

### **Wait for Event**

Stav umožňuje manuální zásah uživatele. Pokud dojde k narušení chodu programu je porušena návaznost, a tedy není možné správné vyhodnocení výsledků. Uživatel má zde možnost přepínat mezi jednotlivými stavy nebo ukončit celý program.

### **Exit**

Dojde k odpojení od zdroje/zátěže. Je ukončena komunikace se všemi přístroji. Spuštěné soubory jsou uzavřeny.

5. Realizace:  
Stanice automatického měření: „S.A.M“

## 5.4 DRUHÁ VERZE (S.A.M-2)

### 5.4.1 Úvod

První verze stanice postrádala mnohá vylepšení. Sestava byla dosti složitá, nepřehledná a v celku objemná. S použitými převodníky a napěťovými děliči chyběla dostatečná přesnost pro coulometrické měření. Příkladem o požadované přesnosti měření řeší literatura [14]. Je zde řešena problematika velmi přesných měřících metod, které by mohly být dále implementovány do programu. Pro splnění podmínek přesného měření bych rád zmínil základní body, které je nutno splnit.

- Elektrický proud je v průběhu cyklů dostatečně přesný a stabilní.
- Měření napětí na článku dosahuje požadované přesnosti.
- Perioda měření je co nejkratší (jednotky sekund).
- Teplota článků je udržována konstantní.

Specifickou výhodou první verze bylo použití řídicí jednotky NI USB-6009, která vyhodnocovala všechny parametry měření. Jak již bylo zmíněno, Labview dokáže velmi jednoduše komunikovat s touto jednotkou. Existují i optimalizované knihovny pro její použití.

Nevýhodou jednotky je její cena. Pro naše účely je zbytečně vysoká.

V této druhé verzi se ukázala možnost úplné náhrady za zařízení, které lze pořídit téměř za setinu ceny oproti zařízení od National Instruments. Zároveň **nedošlo** ke snížení přesnosti měření. Naopak bylo možné použití přesných multimetrů. S použitím multimetrů byly výsledky digitalizovány, a proto došlo k zvýšení odolnosti vůči vnějšímu rušení. Tyto změny byly provedeny na úkor složitější programové interpretace. Bylo nutné sladit více zařízení pro simultánní snímání a zprostředkovat komunikaci s novou řídicí jednotkou. To bylo hlavním problémem této kapitoly.

Hlavní změny stanice:

- Náhrada elektromagnetického relé za „*Solid state*“ relé.
- Náhrada jednotky NI USB-6009 za *Arduino nano*.
- Použití digitálních multimetrů *Agilent 34410A*.

Výsledkem je kompaktní měřící stanice, schopná měření a snadné aplikovatelnosti dalších úprav či změn pro laboratorní účely v rámci laboratoře fotovoltaických systémů a elektrochemických zdrojů na katedře elektrotechnologie (LFSEZ).

### 5.4.2 Solid state relé (SSR)

V rámci práce bylo možné nahradit elektromagnetické relé za tak zvané „solid state relay“ Relé bylo pro tento účel „ubastleno“ na katedře elektrotechnologie.

Použití polovodičových spínacích prvků zajišťuje zvýšení spolehlivosti funkce spínače. Elektromagnetické spínače mají mnoho nevýhod.

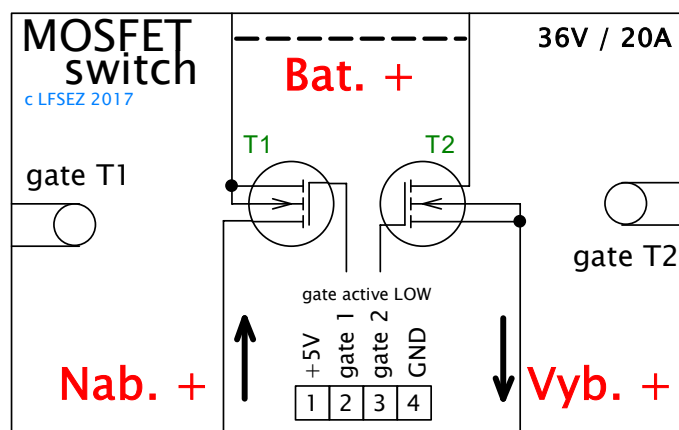
- Obsahují pohyblivé části, které jsou hlučné a rychleji dochází k jejímu opotřebení.
- Mají větší rozměry při stejném spínaném výkonu.
- Jsou náročnější z hlediska napájení.
- Nižší odolnost vůči rušení.
- Jiné nedostatky...

Štítkové údaje, nesoucí informaci o podmínkách bezpečného sepnutí, jsou uvedeny na krycím víku. Polovodičový spínač je schopen vypínat do proudového zatížení 20 A a napětí 36 V. Napájení je zprostředkováno řídicí jednotkou, která poskytuje napájecí napětí +5 V. K sepnutí dochází při přivedení nulového napětí na „gate“ vzhledem k zemi.

Základní parametry:

- Spínání: 36 V/20 A
- Napájení: +5 V/max 500 mA(USB)
- Podmínky sepnutí: logická nula na gate

Z počátku byl problém s proudovým omezením při nabíjení kondenzátorů ve spínacím obvodu. Pro řídicí jednotku, napájenou z USB, byl špičkový proud příliš vysoký. Použitím rezistorů s vyšší hodnotou odporu v obvodu bylo docíleno dostatečného proudového omezení.



Obr. 14 Náhrada za elektromagnetické relé (štítkové údaje)

\*Dokumentace viz: Příloha C.1

5. Realizace:  
Stanice automatického měření: „S.A.M“

Použité součástky:

### **MOSFET – STW75NF30**

Součástka je schopna vypínat výrazně větší proudy, nežli je uvedeno na štítku spínače. Omezení je dáno konstrukčními parametry zařízení. Dalším důvodem je omezení z hlediska maximálního proudu, který dokáže poskytnout zdroj.

Tab. 4 Tabulka základních parametrů polovodičového spínače

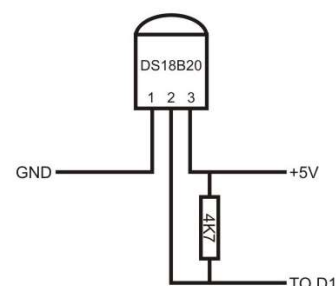
Type	V <sub>DSS</sub>	R <sub>DS(on) max</sub>	I <sub>D</sub>	P <sub>W</sub>
STW75NF30	300 V	< 0.045 Ω	60 A	320 W

### **5.4.3 Teplotní senzor: DS18B20**

Jde o digitální teplotní senzor, který vyžaduje pouze jeden pin pro komunikaci.

Základní parametry:

- Napájení: 3-5,5 V
- Teplotní rozsah: -55°- 125°C
- Přesnosti měření: ±0,5°C
- Rozlišení přístroje: 9-12 bit (dle nastavení)



Pro snímání teploty je využito nastavení desetibitového rozlišení. Po nastavení nižšího rozlišení se doba převodu snížila ze 750 ms (12bit) na 187,5 ms (10bit), rozlišení teploty je poté 0,25°C. Rychlost převodu byla uplatněna v programu, kdy je vhodné simultánní snímání všech veličin. Cílem bylo snížit periodu měření pod 1 sekundu. Pro naše účely je rozlišení více než dostatečné.

### **5.4.4 Digitální multimetr Agilent 34410A**

Tyto přesné multimetry umožnily dosažení požadované přesnosti měření napětí a proudu, což je pro coulometrické měření důležité.

Zadání této bakalářské práce požaduje schopnost stanice měřit akumulátorové články, které dosahují napětí 5 V a proudové zatížitelnosti jednotek ampér. Reálné možnosti zdroje a zátěže jsou schopné dodat proud dosahující 20 A. Bylo na škodu nevyužít jejich potenciálu. S použitím proudového bočníku Agilent 34330A lze měřit s multimetrem proud do 15 A namísto 3 A (V případě použití jako ampérmetr.) Tímto bylo možno rozšířit schopnosti měření o objemnější akumulátory, jako je například klasická autobaterie.

Komunikace s multimetrem je zajištěna pomocí počítačové sítě v laboratoři.

Základní parametry:

- Proudový rozsah: 0-3 A
- Napěťový rozsah: 0-1000 V



➤ Přesnost měření

**Accuracy Specifications ± (% of reading + % of range)<sup>1</sup>**

Function Coefficient/°C	Range <sup>3</sup>	Frequency, Test Current or Burden Voltage	24 Hour <sup>2</sup>	90 Day	1 Year
			Tcal ± 1 °C	Tcal ± 5 °C	Tcal ± 5 °C
<b>DC Voltage</b>	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0035 + 0.0007
	<b>10.00000 V</b>		<b>0.0015 + 0.0004</b>	<b>0.0020 + 0.0005</b>	<b>0.0030 + 0.0005</b>
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0040 + 0.0006
	1000.000 V <sup>4</sup>		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0040 + 0.0006
<b>DC Current</b>	100.0000 µA	< 0.03 V	0.010 + 0.020	0.040 + 0.025	0.050 + 0.025
	<b>1.000000 mA</b>	<b>&lt; 0.3 V</b>	<b>0.007 + 0.006</b>	<b>0.030 + 0.006</b>	<b>0.050 + 0.006</b>
	10.00000 mA	< 0.03 V	0.007 + 0.020	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020
	100.0000 mA	< 0.3 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005
	1.000000 A	< 0.8 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010
	3.000000 A	< 2.0 V	0.100 + 0.020	0.120 + 0.020	0.150 + 0.020

Obr. 15 Přesnost měření přístroje Agilent 34410A [20]

➤ Proudový bočník:

- Rozsah: 0-15 A (stálé, 30 A- max.15 min)
- Převodní konstanta: 1 mV/A
- Přesnost: ± 0.3 % (do 1kHz)

### 5.4.5 Řídící jednotka Arduino

Jak již bylo zmíněno, došlo nahrazení řídicí jednotky NI USB 6009 za Arduino. Jednotka Arduino je výrazně levnější oproti 6009. Aby bylo možné nahradit jednotku, bylo nutné vypořádat se s několika nedostatky. Zejména zprostředkování spolehlivé a jednoduché komunikace.

Jako testovací zařízení bylo využito Arduino Uno\*. Pro finální verzi byl sestaven obvod s jednotkou Arduino Nano\*, které jsou téměř totožné se svými vlastnostmi a používají totožný mikroprocesor. Výrazný rozdíl je v rozměrech\*.

\*Viz příloha C.2.1

5. Realizace:  
Stanice automatického měření: „S.A.M“

### **Arduino UNO(Nano)**

Jádrem jednotky je mikroprocesorová deska založenou na ATmega328.

Základní parametry:

- Digitální I/O piny: 14
- Analogové vstupy: 6
- krystalový oscilátor: 16 MHz
- Konektory: USB + vlastní napájení
- Maximální proud pro I/O piny: 40 mA
- Tlačítko pro reset
- A další [17]

Pro komunikaci s programem LabVIEW jsou k dispozici knihovny LIFA (LabVIEW Interface for Arduino) a LINX. Bohužel žádná z knihoven není dostatečně spolehlivá a jednoduchá pro naše využití. Proto byl vytvořen jednoduchý program pro vlastní komunikaci s LabVIEW, který je nutné nahrát do mikroprocesoru. Jde o jednoduchý program přibližně zahrnující:

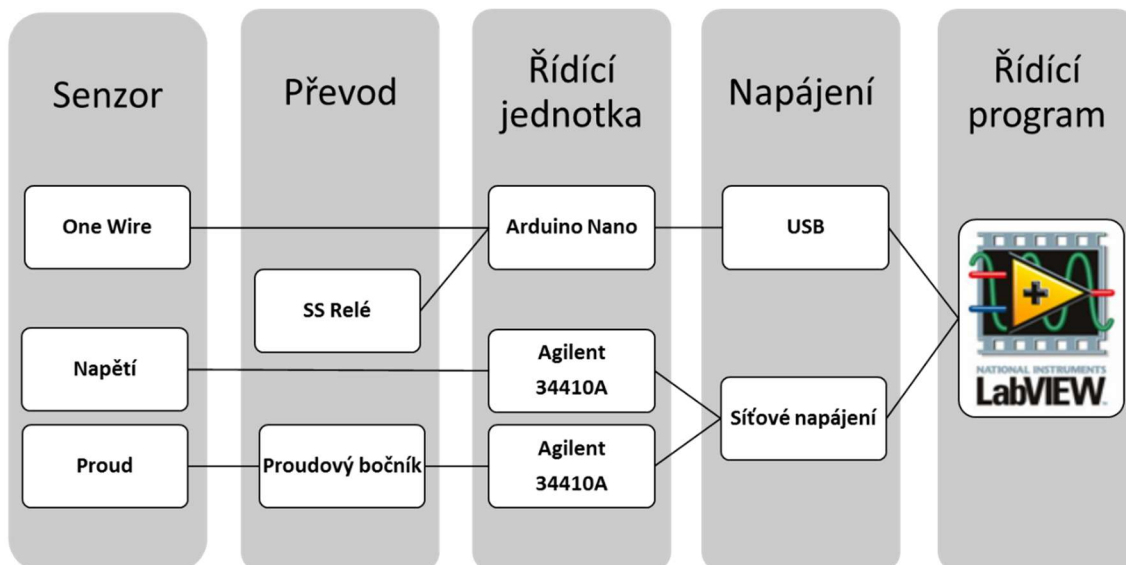
- Konfiguraci pinů spínacích prvků a teplotního senzoru.
- Zahrnutí knihoven pro měření teploty (Dallas Temperature).
- Komunikaci po sériové lince.
- Definici slova, které zahájí příslušné operace (stavy spínačů, snímání teploty...).

Pro finální provedení byl vytvořen jednoduchý plošný spoj, který byl osazen mikroprocesorovou deskou *Arduino Nano* a výstupními konektory zajišťující komunikace. Pro komunikaci spojující SS relé byl použit rozměrový typ konektoru RJ-11. Komunikace s teplotním senzorem OneWire byl použit konektor RJ-12. Rozdílné typy rozměrů zamezí možné záměně zdířek.

K výrobě krycí krabičky bylo využito 3D tiskárny v rámci strahovského studentského klubu. Pro tento účel byla krabička vymodelována a vytištěna.

*Výsledný vzhled Viz. Příloha C.2.3*

### 5.4.6 Shrnutí



Obr. 16 Diagram zapojení S.A.M-2

## 5.5 NEJISTOTA MĚŘENÍ (S.A.M-2)

O nejistotách měření je pojednáno v teoretické přípravě v kapitole 4.2. Výpočet je ovlivněn více faktory při měření dodaného náboje. Jednotlivé faktory budou rozloženy na jednotlivé výpočty nebo alespoň náznaky výpočtu.

Data jsou ovlivněny:

- Nejistotou stability proudu dodané zdrojem či zátěží.
- Nejistotou měření z multimetru *Agilent 34410A*.
- Nejistota proudového bočníku *Agilent 34330A*.
- Nejistota časového údaje.
- Integrační chyba.

Pro stanovení nejistoty je nutné uplatnit vztah (19) pro nepřímé měření na výpočet elektrického náboje. Nejistota je ovlivněna, jak nejistotou měření elektrického proudu, tak měřením času.

### 5.5.1 Standardní nejistota zdroje/ zátěže

Výpočet reprezentuje možné zvlnění proudu od zdroje/zátěže, kde nejistota měření je dána pouze parametry přístroje Tab. 2 a Tab. 3.

Získáme vztah:

$$u_I = \frac{\sqrt{\left(I \cdot \frac{\delta_{11}}{100} + \delta_{12} + \delta_2\right)^2 + (\delta_3)^2}}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

$u_I$  ... standardní nejistota typu B

$\delta_{11}$  ... % chyba z odečtené hodnoty

$\delta_{12}$  ... konstantní složka chyby z odečtené hodnoty

$\delta_2$  ... chyba z rozsahu

$\delta_3$  ... další vlivy chyby např. šum

5. Realizace:  
Stanice automatického měření: „S.A.M“

### **Příklad**

Pokud akumulátor dosáhne maximálního povoleného napětí, řízený zdroj automaticky přepíná z režimu konstantního proudu do režimu konstantního napětí. Proud postupně klesá. Ve fázi konstantního napětí je výpočet pro zvlnění proudu poněkud složitější. Lze vycházet ze střední hodnoty proudu pro daný interval. Vzor výpočtu je následující.

Předpokládejme průchod proudu 2 A po dobu 5 h.

➤ Zdroj

$$u_Q = u_I \cdot t = \frac{\left(2 \cdot \frac{0,2}{100} + 0,003\right) + 0,002}{\sqrt{3}} \cdot 5 [Ah] = 0,0261 [Ah]$$

➤ Zátěž

$$u_Q = u_I \cdot t = \frac{\sqrt{\left(2 A \cdot \frac{0,1}{100} + 0,01\right)^2 + (0,002)^2}}{\sqrt{3}} \cdot 5 [Ah] = 0,0351 [Ah]$$

## **5.5.2 Standardní nejistota multimetru Agilent 34410A s bočníkem Agilent 34330A**

Nejistota typu A není zde uvažována. Bylo by nutné dalších měření pro určení směrodatné odchylky viz. kapitola 4.2. Nejistoty měření jsou zobrazeny na Obr. 15. Pro standardní nejistotu typu B (napětí a proudu) platí rovnice (17) dále se uplatní nejistota nepřímého měření při měření proudu (19) derivujeme jednoduchý vztah:

$$I = \frac{U}{k} \quad (21)$$

$U$  ... údaj napětí [V]

$k$  ... převodní konstanta bočníku (1 mV/A)

Po derivování dostaneme rovnici:

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{-U}{k^2} \cdot u_k\right)^2 + \left(\frac{1}{k} \cdot u_U\right)^2} \quad (22)$$

$u_k$  ... standardní nejistota proudového bočníku [V/A]

$u_U$  ... standardní nejistota multimetru [V]

- Měření proudu s bočníkem Agilent 34330A a multimetrem 34410A

Nejistota je dána dle (22) po dosazení dostaneme tvar:

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{-U}{k^2} \cdot \frac{\delta_{11}}{100} X\right)^2 + \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{\delta_{21}}{100} X + \frac{\delta_{22}}{100} M\right)^2} \quad (23)$$

$\delta_{11}$  ... chyba měření proudového bočníku [%]

$\delta_{21}$  ... chyba multimetru z odečtené hodnoty [%]

$\delta_{22}$  ... chyba multimetru z rozsahu [%]

$X$  ... měřený údaj

$M$  ... použitý rozsah

### **Příklad**

- Měřené napětí multimetrem Agilent 34410A

Předpokládejme kalibraci na 1 rok platnosti.

$$u_U = \frac{13 \cdot \frac{0,0040}{100} + \frac{0,0006}{100} \cdot 100}{\sqrt{3}} [V] = 0,647 [mV]$$

- Snímání proudu multimetrem Agilent s proudovým bočníkem

Vyčíslíme vztah (23). Dosadíme parametry dané výrobcem z kapitoly 5.4.4. Uvažujeme předchozí příklad. Hodnota proudu 2 A. Dojde k převodu na napětí dle (21). Údaj na multimetru bude tedy 2 mV.

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{0,002}{(0,001)^2} \cdot \frac{0,3}{100} \cdot \frac{0,001}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,001} \cdot \frac{0,005}{100} \cdot 0,002 + \frac{0,0035}{100} \cdot 0,1\right)^2} [A] = 0,00404 A$$

### **5.5.3 Kombinovaná standardní nejistota proudu**

Pro kombinovanou standardní nejistotu elektrického proud platí vztah (18). Uplatní se nestabilita zdroje/zátěže i chyba měření pomocí multimetru. Po dosazení a jednoduchých úpravách získáme tvar:

$$u_{Ic} = \sqrt{\frac{1}{3} \left( \left( I \cdot \frac{\delta_{z11}}{100} + \delta_{z12} + \delta_{z2} \right)^2 + (\delta_{z3})^2 + \left( \frac{-U}{k^2} \cdot \frac{\delta_{B11}}{100} X \right)^2 + \left( \frac{1}{k} \cdot \frac{\delta_{M21}}{100} X + \frac{\delta_{M22}}{100} M \right)^2 \right)} \quad (24)$$

Pro náš již vypočtený příklad, kdy budeme uvažovat stav s připojenou zátěží 2 A po dobu 5 h:

$$u_{Ic} = \sqrt{0,00703^2 + 0,00404^2} A = 0,00810 A$$

$$u_Q = 0,00810 \cdot 5 [Ah] = 40,5 mAh$$

5. Realizace:  
Stanice automatického měření: „S.A.M“

### 5.5.4 Nejistota z časového údaje

Nejistotu z časového údaje uvažujeme značně menší, nežli je nejistota způsobená měřením proudu.

Současné provedení programu má v tomto směru pár nedokonalostí, které by v budoucnu mohli být eliminovány. Budou pouze zmíněny jednotlivé aspekty nejistoty. Podrobnější rozbor by přesahoval rozsah této práce.

Nejistotu z časového údaje ovlivňují:

- Přesné stanovení časového údaje. Program využívá systémového času počítače, který uvádí přesnost  $\pm 1$  ms.
- Odezva měřících přístrojů. Tuto chybu lze částečně korigovat určením střední hodnoty časového zpoždění. Pokud uvážíme střední hodnotu zpoždění jako konstantní, uplatní se na každém intervalu stejným dílem. Tímto je zpoždění potlačeno. Následně bude mít pouze vliv nejistota typu A. Směrodatná odchylka střední hodnoty zpoždění, které je nutno změřit.
- Určení kritické cesty programu. Nejistota má vliv na nejistotu měření. Optimalizací programu byla tato nepřesnost eliminována. Oproti ostatním nejistotám je doba kritické cesty zanedbatelná.

Vzhledem k výše uvedeným časovým odchylkám můžeme nejistotu z časového údaje zanedbat.

### 5.5.5 Integrační chyba

Tato část řeší otázku určení měřících intervalů. Naskytují se možnosti stanovení periody měření nikoli na základě pevně stanoveného  $\tau$ , ale například na základě  $\Delta U$ ,  $\Delta I$ ,  $\frac{dU}{dt}$ ,  $\frac{dI}{dt}$ , to speciálně platí pro další analytické metody uvedené v literatuře [14]

Pokud řešíme otázku integrační chyby při pevně stanoveném  $\Delta t$ . Musíme analyzovat použitou metodu numerického integrálu. Máme možnost využití například obdélníkové, lichoběžníkové nebo Simpsonovy metody. Na základě počtu integračních kroků ovlivňujeme chybu numerické integrace. Matematická analýza nám poskytuje možnost stanovení odhadu numerického integrálu. V rámci této práce se nebudu detailněji zabývat touto problematikou. Podrobnější řešení je vhodné v pro navazující diplomovou práci.

Pouze zmíním, že program LabVIEW je schopný volby různých integračních metod. Prozatím je zvolena Simpsonova metoda, která je metodou poměrně přesnou se zachováním nízkým počtem integračních kroků. Intervaly jsou aproximovány polynomem n-tého řádu a lze nalézt vzorec pro odhad chyby numerického integrálu.

### 5.5.6 Shrnutí

Byly uváženy aspekty ovlivňující přesnost měření z hlediska měřících přístrojů. Nejistoty *typu A* a zanedbané nejistoty nemohou být přesně stanoveny, z důvodu nedostatku získaných dat. Pro rigorózní výpočet by bylo nutné uvážit míru vlivu zanedbávaných veličin.

Výsledná nejistota měření je dána vztahem (24). Pro náš již zmiňovaný příklad je velikost nejistoty měření, při nastaveném proudu zátěže 2 A po dobu 5 h, 40,5 mAh. Nejistoty měřících přístrojů jsou již nejistotami rozšířeny.

Vzhledem k zanedbání nejistot budeme uvažovat koeficient rozšíření namísto  $k_r = 2 \rightarrow k_r = 3$ . Finální nejistota měření bude tedy 60,75 mAh. Vyjádřeno v relativním tvaru 0,66 %.

*\*Nutno zmínit, že přesnost lze stále zvýšit kalibrováním měřících přístrojů. (Viz. Obr. 15).*

## 6 SÉRIE MĚŘENÍ

---

Po realizaci měřicího stanoviště navazuje série měření vzorků pro možné vyhodnocení funkčnosti. Prvním vzorkem byla olověná autobaterie GP 12260 12V/26Ah. Tento výběr byl z důvodu její vyšší uživatelské odolnosti, nižší kapacity, a tedy časově méně náročné cykly. Po ověření bezpečného chodu stanice bylo překročeno k akumulátoru na bázi lithia *Thundersky LP12V40AH, který je z hlediska SOH ve velmi špatném stavu.*

*Měření přineslo praktické zkušenosti a ukázalo další nedostatky v mnoha ohledech, které by mohly nastínit další pokračování ve vývoji stanice. Opět se ověřila již zmiňovaná modularita systému, kdy jsou možné rychlé úpravy pro správný postup měření.*

### 6.1 TEST AKUMULÁTORU GP 12260 12V/26AH

Pro možnost porovnání byl akumulátor cyklován měřicí stanicí H-Tronic ACCUMASTER C5. (Obrázek viz příloha).

*Základní parametry:*

- Počet programů pro údržbu akumulátoru: 6
- Typy podporovaných akumulátorů:  
NiCd, NiMH, Li-ion, Li-Polymer a olověné akumulátory
- Maximální nabíjecí/vybíjecí proud: 5000 mA
- Rozsah kapacit akumulátorů: 100 mAh- 100 Ah
- Maximální napětí olověného akumulátoru 28 V
- Snímání teploty jednotlivých článků

Naměřené hodnoty vedly k velmi zajímavým výsledkům, avšak ne plně uspokojivým. Nepodařilo se úspěšně změřit účinnost nabíjení/vybíjení celých cyklů. Důvodem bylo nedobíjení akumulátoru na původní mez nabití. Je nutno zdůraznit, že výsledky přinesly důležité zkušenosti, které je možno při dalším vývoji uplatnit.

Pro účely snadného vyhodnocení bylo vytvořeno dalšího podprogramu, který automaticky vyhodnotí a graficky zobrazí výsledky měření. Uživatel pouze zadá cílovou složku s obsaženými daty. (Viz. Příloha E)

Zpočátku byly provedeny 4 cykly na stanici S.A.M, následně byly změřeny 3 cykly pomocí stanice ACCUMASTER, posléze bylo provedeno dalších 7 cyklů na naší stanici. Maximální napájecí proud byl zvolen 5 A, hodnota vybíjecího proudu byla 2 A.

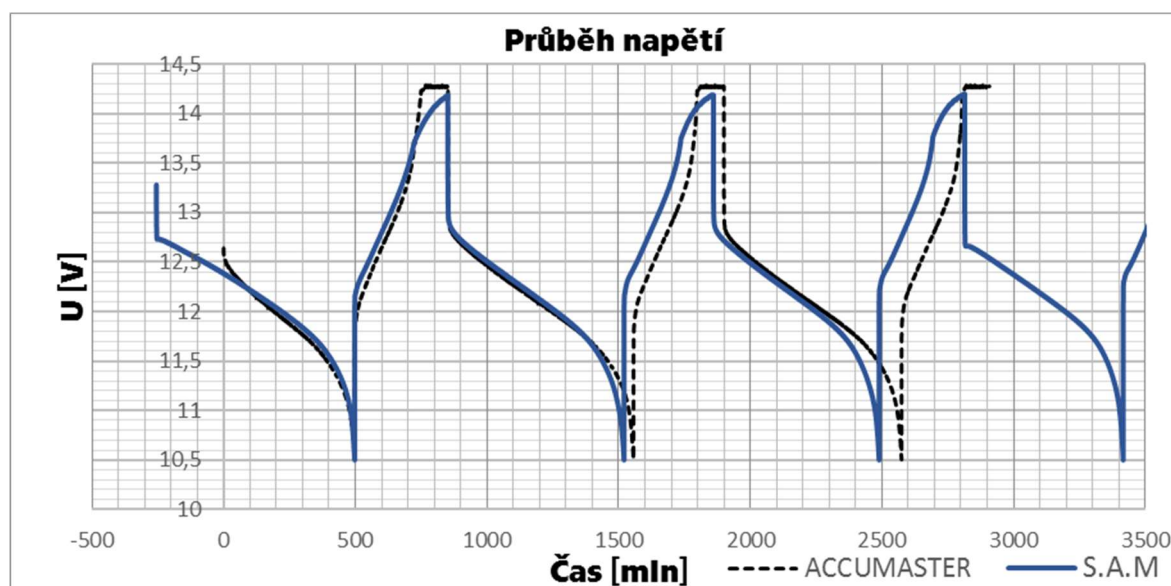
První nejasnosti předkládají výsledky v souboru „Efficiency test results“ z druhé série měření. Znepokojivé jsou výsledky účinnosti cyklů. Detailnější pohled na problematiku poskytuje grafické vyhodnocení průběhů napětí, proudu a kapacity při srovnání s výsledky ze stanice ACCUMASTER.



Tab. 5 Výsledná tabulka hodnot pro olověný akumulátor

Date	24.4.2017	Start Time	11:05
Battery type	Lead Acid		
Capacity [mAh]			
Charge cycle	Discharge cycle	Coulombic efficiency	
22773,66	25488,2	1,12	
21643,09	22657,25	1,05	
20574,02	21314,4	1,04	
19790	20078,1	1,01	
19015,97	19027,45	1	
18208,98	18267,81	1	
17498,35	17533,69	1	

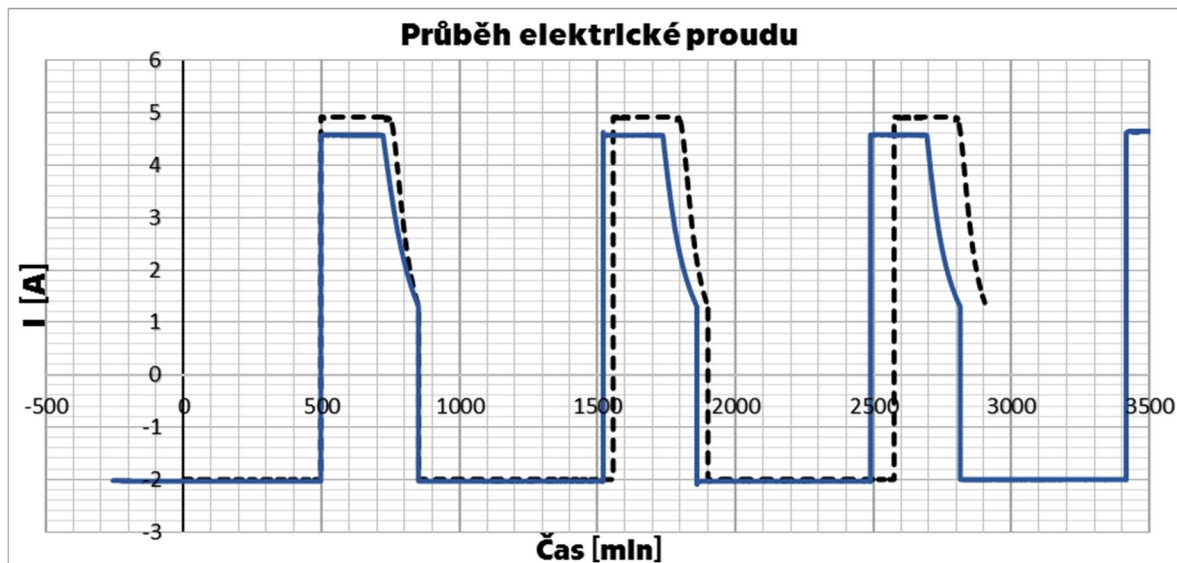
Nápadným znakem jsou data uvedené v tabulce s výsledky. Postupný pokles dodávaného a odebíraného náboje v průběhu cyklů je příliš prudký a nemůže se jednat o degradaci akumulátoru. Pro možnost důkladnější analýzy budou uvedeny další průběhy důležitých veličin.



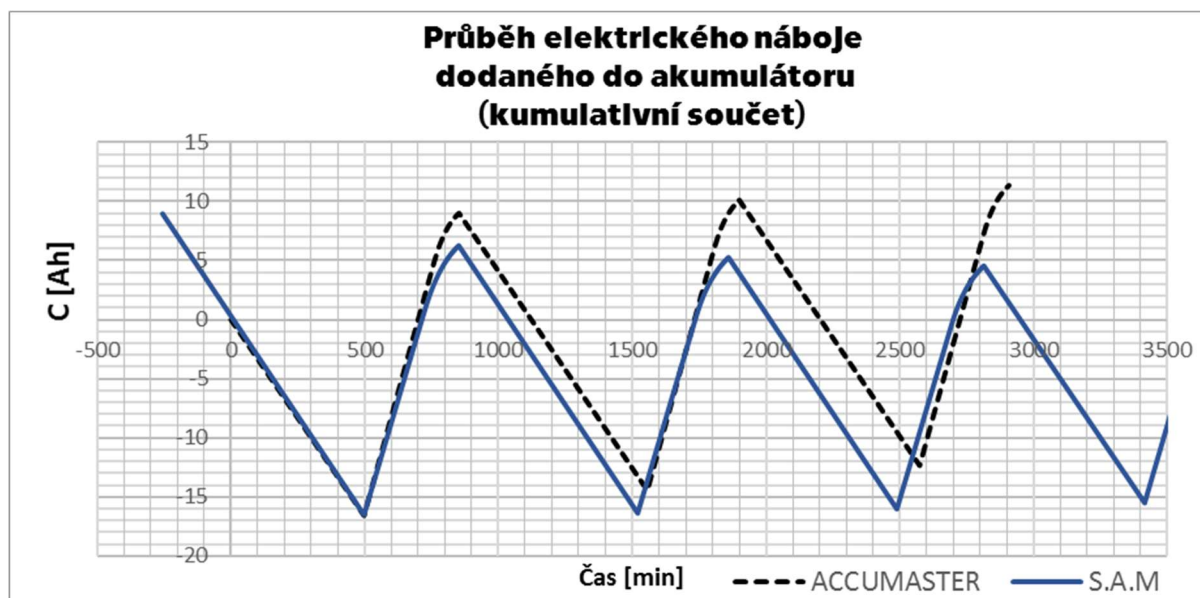
Graf 1: Průběh napětí (porovnané tři cykly)

\*Graf s vyhodnocením všech cyklů viz. Příloha D

## 6. Série měření



Graf. 3 Průběh elektrického proudu během cyklů



Graf. 3 Elektrický náboj dodávaný a odebíraný zdrojem/zátěží

Obě měřicí stanice mají totožné podmínky ukončení cyklu. Ukončení nabíjecího cyklu nastává při dosažení hodnoty elektrického proudu  $5\% C_p$ . Pro akumulátor s kapacitou 26 Ah odpovídá podmínka 1,3 A. K ukončení vybíjecího cyklu dochází při poklesu napěťové hladiny pod mez stanovenou výrobcem. V našem případě velikost konečného napětí byla zvolena 10,5 V.

Z průběhu napětí (Graf 1) lze rozpoznat rozdíl mezi stanicemi, přesněji mezi napájecími zdroji.

Accumaster využívá pravoúhloú ostrou charakteristiku nabíjení konstantní proud/ konstantní napětí (CC/CV). V tomto případě dochází k napájení maximálním povoleným proudem až do dosažení hranice povoleného napětí. Následně nabíjení udržuje tuto hladinu konstantní.

Stanice S.A.M překvapivě nepoužívá takto ostrou charakteristiku. Dříve nežli řízený zdroj Zhaoxin RXN-3020D dosáhne maximálního nastaveného napětí, již dochází ke snižování napájecího proudu a dojde k plynulému přechodu. Ke zdroji nebyl k dispozici řádný datasheet a nebylo možné tuto informaci zjistit.

Odlíšná charakteristika nabíjení měla za důsledek dosažení proudové ukončovací podmínky dříve, nežli došlo k úplnému nabití akumulátoru. Následně došlo k vybití akumulátoru na hladinu napětí 10,5 V. Celý cyklus se opakoval.

Řešením pro úplné dobití, je úprava ukončovací podmínky nabíjení, která by nebyla závislá na kapacitě akumulátoru. Podmínku lze stanovit ze zvoleného nabíjecího proudu. Akumulátor lze považovat za nabitý, pokud hodnota elektrického proudu dosahuje 3 % proudu zvoleného. [18]

Důsledek chybné ukončovací podmínky, kdy došlo následně k zajímavé sestupné tendenci výměny náboje (viz Graf. 3) vede k určitým nejasnostem. Proč dochází k dosažení stejné koncové hodnoty napětí během nabíjení ve stále kratších intervalech. Jaké by bylo následné chování akumulátoru s vyšším počtem cyklů? Tyto otázky nejsou předmětem této práce.

Úkolem práce je vyhodnotit výsledky série měření z hlediska měřicí stanice a jejího správného chování v průběhu měření. Kromě již zmíněného nečekaného chování řízeného zdroje byly zjištěny další určité mezery, které by mohly být v budoucnu vyplněny. Pro kvalitnější vyhodnocení měření navrhuji pro další vývoj.

- Možnost měření napětí naprázdno v průběhu cyklování.
- Uložit počáteční podmínky měření do samostatného souboru nebo doplnit do informace do úvodního měření.
- Automatické zpracování dat do grafů a práci s ním.
- Vytvoření databáze elektrochemických článků s jejich charakteristickými parametry.
- Optimalizace a unifikace tabulkových souborů „csv“ pro snadné zpracování v předem daném softwaru.
- Pro dokonalé nabití provést „dotlačení“ článku pomocí určeného časového intervalu při nízkém proudu.

## 6.2 TEST AKUMULÁTORU THUNDERSKY LP12V40AH

Předchozí měření poukázalo na možná vylepšení stanice, které by bylo vhodné doplnit. Následovalo měření na lithiovém akumulátoru THUNDERSKY LP12V40AH v pokročilém stavu života (SOH), kdy předpokládaná zbylá kapacita byla odhadem 20 Ah.

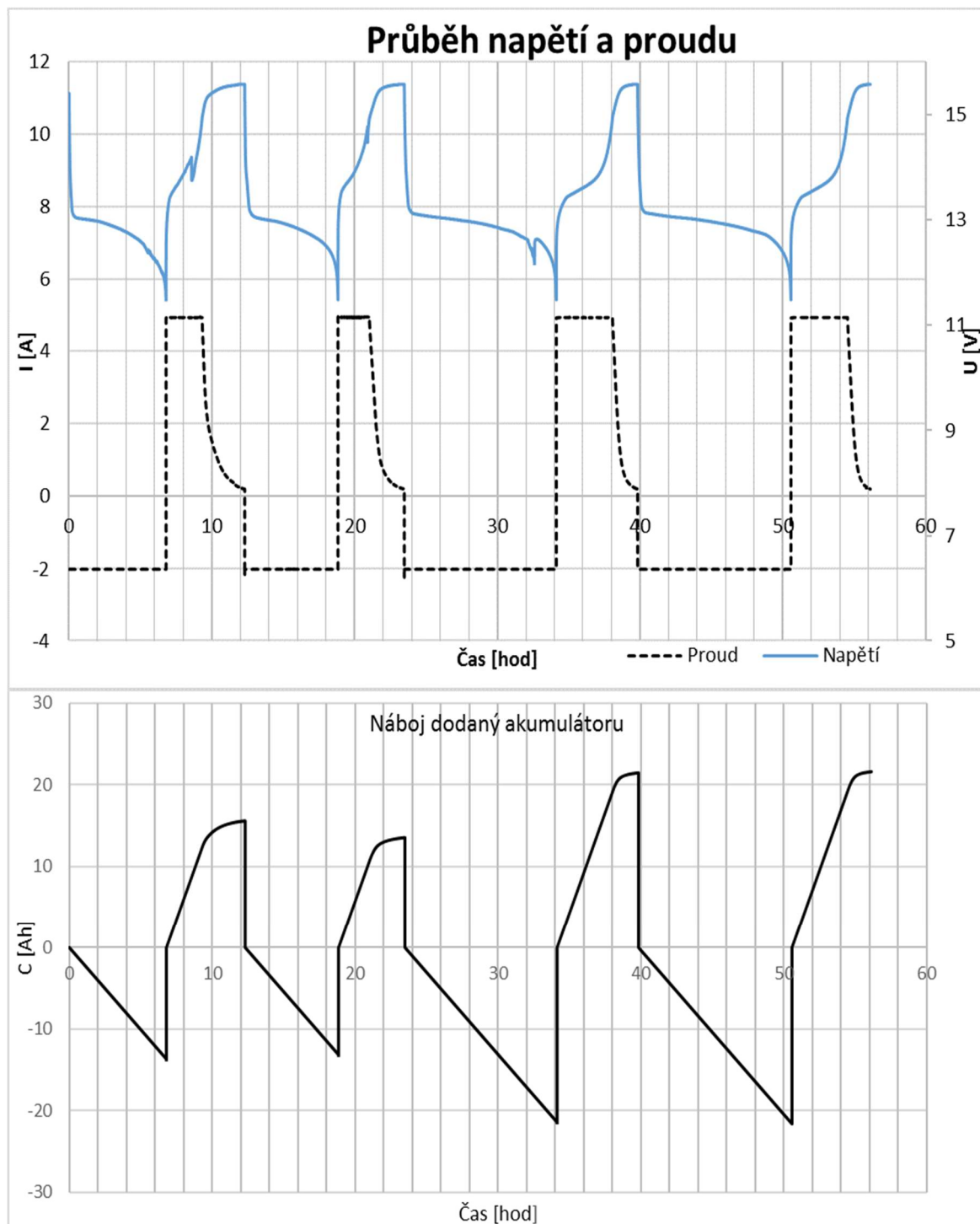
Lithiové akumulátory mohou být zatěžovány vyššími proudy. Vzhledem ke špatnému stavu akumulátoru byly parametry nabíjecího a vybíjecího proudu zvoleny stejně jako v předchozím měření. Tedy pro zdroj 5 A, pro zátěž hodnota 2 A vybíjecího proudu. Z předchozího měření byly poupraveny zásadní chyby pro docílení celých cyklů. Již zmíněná ukončovací proudová podmínka byla nastavena na hodnotu 0,5 %  $C_N$ , což odpovídá 5 % velikosti nabíjecího proudu tedy 0,2A.

V tomto případě byly úspěšně změřeny celé cykly. Výsledky jsou vyneseny do grafů. (Viz. Graf. 4) Na průbězích jsou patrné nečekané výkyvy, navíc po druhém cyklu došlo k náhlému nárůstu kapacity akumulátoru. Souhrn výsledků lze přisoudit k dlouhodobému skladování a jeho pokročilé degradaci. Akumulátor je ideálním kandidátem na testování metodou diferenční analýzy například  $\frac{dV}{dQ}$  o které pojednává literatura [14]. Na základě analýzy lze určit míru degradace nebo posoudit stav elektrod.

Výsledky měření:

Tab. 6 Výsledná tabulka hodnot pro lithiový akumulátor

Date	9.5.2017	Start Time	10:26
Battery type	Lead Acid		
Capacity [mAh]			
Charge cycle[mAh]	Discharge cycle [mAh]	Coulombic efficiency	Energy efficiency
15178,73	13307,26	0,88	0,79
13189,01	12780,52	0,97	0,88
20905,56	20846,56	1	0,93
21024,05	21023,13	1	0,93



Graf. 4 Výsledky akumulátoru THUNDERSKY

## 7 ZÁVĚR

---

Úvodní teoretická část je věnována dynamickým systémům a jejich popisu pomocí náhradního schématu, obvodovými rovnicemi a možnostmi dalších způsobů modelování elektrochemických článků. Druhá část teoretické části je zaměřena na měření účinnosti článků a na nedostatky jiných měřících metod. V poslední části je zaměřena na nejistoty měření a její výpočty.

Hlavním předmětem práce bylo vytvoření automatizovaného pracoviště pro přesné měření účinnosti elektrochemických článků. Důležitým prvkem S.A.M je program vytvořený pomocí grafického programování v LabVIEW, který je řídicím článkem celého procesu. Úspěšně bylo docíleno všech předem stanovených bodů, které program splňuje. Použité přístroje v průběhu realizace jsou zaznamenány. Podrobnější údaje jsou k dispozici v příloze na CD.

Prokázala se modularita systému, kdy bylo možno aplikovat odlišná měřící zařízení pouhou částečnou programovou úpravou systému. Nedošlo ke složité programové implementaci a byla zachována jednoduchá hierarchie procesů. Průběh měření probíhal zcela bez zásahů obsluhy. Ověřila se stabilita a spolehlivost systému.

Stanice S.A.M je schopna měření účinnosti akumulátorů s hodnotami napětí do 60 V a velikostí proudu do 20 A. V budoucnu je program možno doplnit o další měřící metody s navýšením parametrů maximálního napětí a maximálních proudů, které novější přístroje dokáží poskytnout.

Část práce je také věnována výpočtu nejistot měření s použitými přístroji pro druhou verzi stanice. Je zmíněn nástin, jak optimalizovat délku periody měření pro snížení objemu naměřených dat se zachováním opakovatelné přesnosti pro možné navazující diplomové práce. Relativní výsledná nejistota měření pro stanovené měřící parametry byla stanovena na  $\pm 0,66 \%$ .

Poslední část měla za úkol provést sérii ověřovacích měření, které byly vyhodnoceny. První série měření s olověným akumulátorem byly získány důležité poznatky. Na základě těchto zkušeností byly navrženy úpravy pro další verzi. Pro stávající verzi byly provedeny nutné změny. Na základě těchto úprav byl úspěšně odměřen lithiový akumulátor Thundersky a jeho výsledky úspěšně vyhodnoceny jako platné.

Byly tedy splněny všechny stanovené cíle z části 5.1. Získali jsme tak nástroj pro výzkumné účely, který poskytuje v případě potřeby snadnou modifikovatelnost systému a je aplikovatelný na rozličné metody měření s možností dosažení velmi přesného výsledku.

Aplikovatelností systému pro další účely má stanice prostor pro budoucí rozvoj v navazující diplomové práci, která nabírá na významnosti se stále rozšiřující oblastí elektrochemických článků.

\*Problematika elektrochemických článků je dynamicky se rozvíjícím odvětvím, který postrádá sjednocenou a kvalitně zpracovanou literaturu českém jazyce. Je nutno podotknout, že převážné množství informačních zdrojů je v anglickém jazyce. V práci bylo nutné hledat náležité překlady pojmů, které dosud nemají ustálený český ekvivalent a nemusí být zcela korektní.

## 8 LITERATURA

---

- [1] *Allaboutbatteries.com: History of battery invention and development* [online]. 2011 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.allaboutbatteries.com/history-of-batteries.html>
- [2] LINDEN, David. a Thomas REDDY. *Handbook of batteries*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002. ISBN 0071359788.
- [3] REICHL, Tomáš. *Impulsní charakteristika baterií*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina Ph.D.
- [4] PTÁČEK, Viktor. *Automatizovaný systém pro měření parametrů akumulátorových baterií* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-12-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61131?locale-attribute=en>. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina Phd.
- [5] CETL, Tomáš. *Aplikace elektrochemických zdrojů*. Vyd. 1. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001028593.
- [6] JACKEY, Robyn. A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection. In: *SAE International* [online]. Orchard Hill Place: The MathWorks, 2007, s. - [cit. 2016-12-18]. DOI: 10.4271/2007-01-0778. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2007-01-0778/>
- [7] HE, Hongwen, Rui XIONG a Jinxin FAN. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*. 2011, **4**(12), 582-598. DOI: 10.3390/en4040582. ISSN 1996-1073. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/4/4/582/>
- [8] BAJRACHARYA, Quree. *Dynamic Modeling, Monitoring and Control of Energy Storage System*. Karlstad, 2013. Diplomová práce. Karlstad University. Vedoucí práce Dr. Magnus Mossberg.
- [9] RAHMOUN, Ahmad a Helmuth BIECHL. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Electrical Review* [online]. 2012, **2012**(7), 1-5 [cit. 2017-03-19]. ISSN 0033-2097. Dostupné z: <http://www.red.pe.org.pl/articles/2012/7b/40.pdf>
- [10] AURILIO, G., D. GALLO, C. LANDI, M. LUISO, A. ROSANO, M. LANDI a V. PACIELLO. A battery equivalent-circuit model and an advanced technique for parameter estimation. In: *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings* [online]. Aversa, Italy: IEEE, 2015, s. 1705-1710 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151537. ISBN 9781479961146. ISSN 1091-5281. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7151537/>



- [11] *Battery Test Manual For Plug-In Hybrid Electric Vehicles* [online]. 3. The Idaho National Laboratory: U.S. Department of Energy, 2014 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/6308373.pdf>
- [12] KANG, Jianqiang, Fuwu YAN, Pei ZHANG a Changqing DU. A novel way to calculate energy efficiency for rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*. 2012, **206**, 310-314. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.105>. ISSN 03787753. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312002066>
- [13] LI, Kaiyuan a King Jet TSENG. Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in micro-grid. In: *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* [online]. IEEE, 2015, s. 005235-005240 [cit. 2017-03-27]. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392923. ISBN 9781479917624. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7392923/>
- [14] SMITH, A. J., J. C. BURNS a J. R. DAHN. A High Precision Study of the Coulombic Efficiency of Li-Ion Batteries. *Electrochemical and Solid-State Letters* [online]. 2010, **13**(12), 177- [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1149/1.3487637. ISSN 10990062. Dostupné z: <http://esl.ecsdl.org/cgi/doi/10.1149/1.3487637>
- [15] ČERVENKA, Milan. *Zpracování fyzikálních měření* [online]. 1. katedra fyziky FEL-ČVUT, 2013 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://fyzika.feld.cvut.cz/~cervenka/vyuka/zprfm/zpracdat.pdf>
- [16] *National Instruments* [online]. National Instruments Corporation, 2017 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.ni.com>
- [17] SELECKÝ, Matúš. *Arduino: uživatelská příručka*. 1. vydání. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 9788025148402.
- [18] BUCHMANN, Isidor. *Battery University* [online]. Richmond, British Columbia, Canada: Cadex Electronics, 2016 [cit. 2016-12-09]. Dostupné z: <http://batteryuniversity.com/>
- [19] JOSSEN, Andreas. Fundamentals of battery dynamics. *Journal of Power Sources*. 2006, **154**(2), 530-538. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.041>. ISSN 03787753. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305014321>
- [20] *Keysight Technologies* [online]. 2001 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.keysight.com>

## 9 SEZNAMY A PŘÍLOHY

---

### 9.1 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Dynamika procesů závislosti na čase [19] [3] .....	10
Obr. 2: Schéma IR modelu .....	11
Obr. 3 Theveninův náhradní obvod .....	12
Obr. 4: Dual Polarization model (DP model) .....	13
Obr. 5: Dual Polarization model (DP model) .....	13
Obr. 6: Pulsní metoda pro stanovení účinnosti [11] .....	15
Obr. 7: Křivky pro stanovení $U_{oc}(SOC)$ [12] .....	17
Obr. 8 Příklad vlivu kalibrace na přístroj [14].....	19
Obr. 9: Základní koncept stanice.....	22
Obr. 10: NI USB-6009.....	24
Obr. 11 Diagram zapojení základního konceptu.....	24
Obr. 12 Hlavní stavový diagram programu .....	27
Obr. 13 Přejechy stavů pro Rele change.....	29
Obr. 14 Náhrada za elektromagnetické relé (štítkové údaje).....	31
Obr. 15 Přesnost měření přístroje Agilent 34410A [20].....	33
Obr. 16 Diagram zapojení S.A.M-2 .....	35

### 9.2 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Číselné hodnoty náhradního schématu Převzato z [10].....	14
Tab. 2 Údaje přesnosti pro zátěž GW Instek PEL-300.....	22
Tab. 3 Údaje přesnosti pro zdroj Zhaoxin RXN-3020D .....	23
Tab. 4 Tabulka základních parametrů polovodičového spínače.....	32
Tab. 5 Výsledná tabulka hodnot pro olovený akumulátor.....	41
Tab. 6 Výsledná tabulka hodnot pro lithiový akumulátor .....	44

### 9.3 SEZNAM GRAFŮ

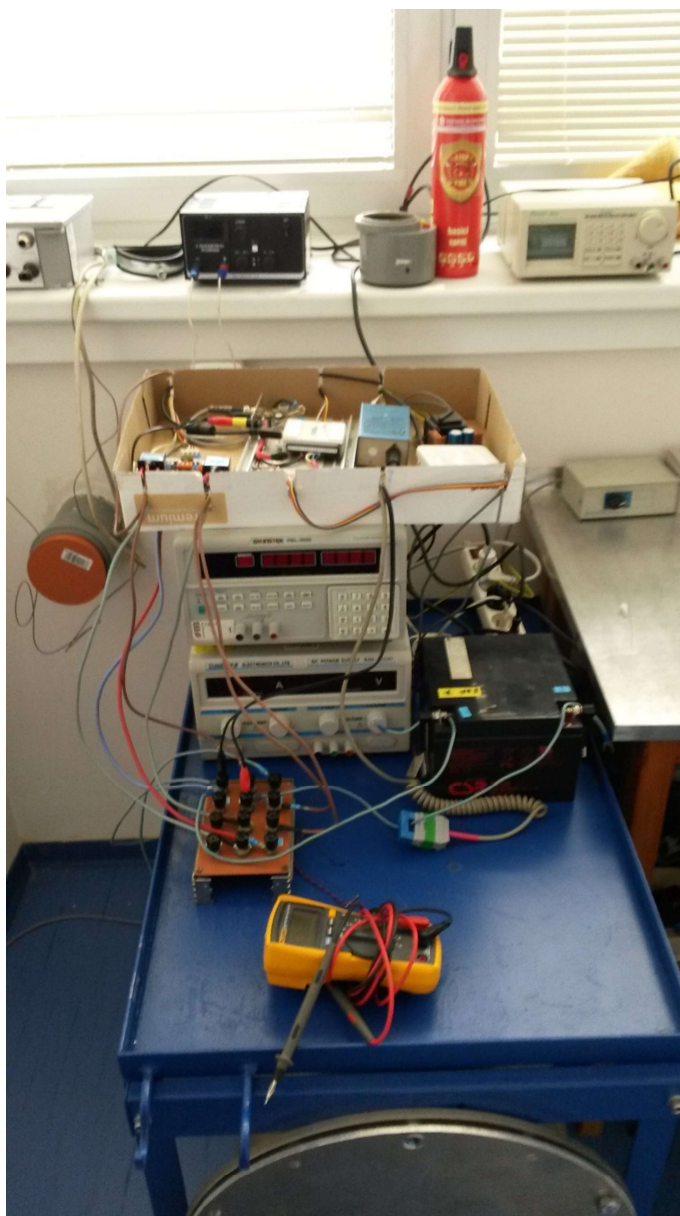
Graf 1: Průběh napětí (porovnané tři cykly).....	41
Graf. 3 Průběh elektrického proudu během cyklů .....	42
Graf. 3 Elektrický náboj dodávaný a odebíraný zdrojem/zátěží.....	42
Graf. 4 Výsledky akumulátoru THUNDERSKY .....	45

# 10 PŘÍLOHA

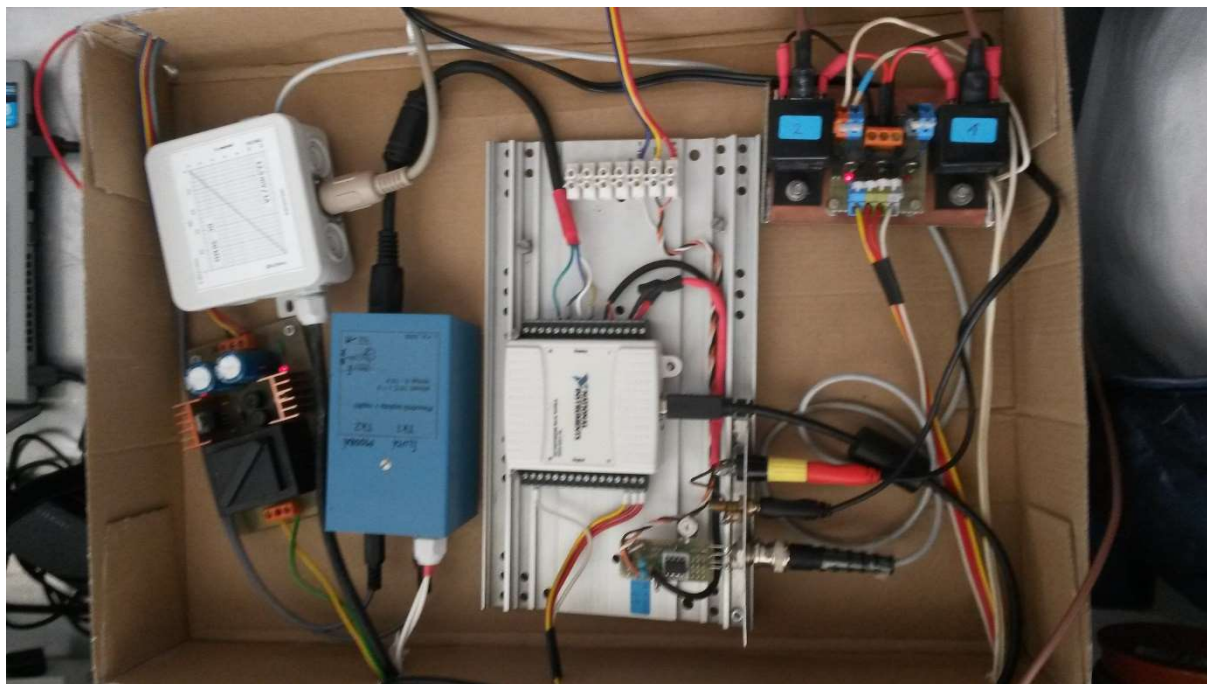
---

## A S.A.M-1

### A.1 Pohled zředu



## A.2 Pohled shora



## B Programová část

### B.1 Úvodní okno vstupních parametrů

**Battery parameters**

Battery type

Capacity [mAh]	Maximum Teperature [°C]
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="45"/>
Cut-off Current constant [-]	Maximum Voltage
<input type="text" value="0,02"/>	<input type="text" value="5"/>
<small>(while charging Example 0,02C)</small>	Cut-off Voltage
	<input type="text" value="10"/>
	<small>(while discharging)</small>

**Source x Load configuration**

Load Current [A]	Source Current [A]
<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>

**Testing parameters**

Number of cycles	
<input type="text" value="2"/>	
Sample Period [s]	Relax time [s]
<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="5"/>

**Data log**

✔ OK

✘ Cancel

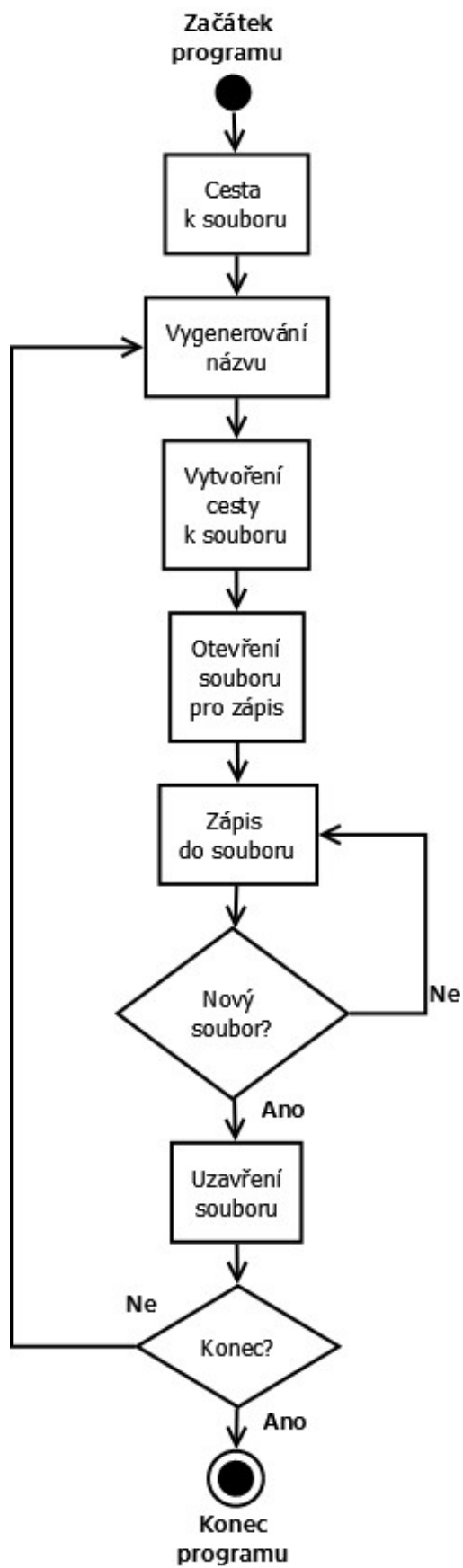
## B.2 Soubory pro ukládání dat

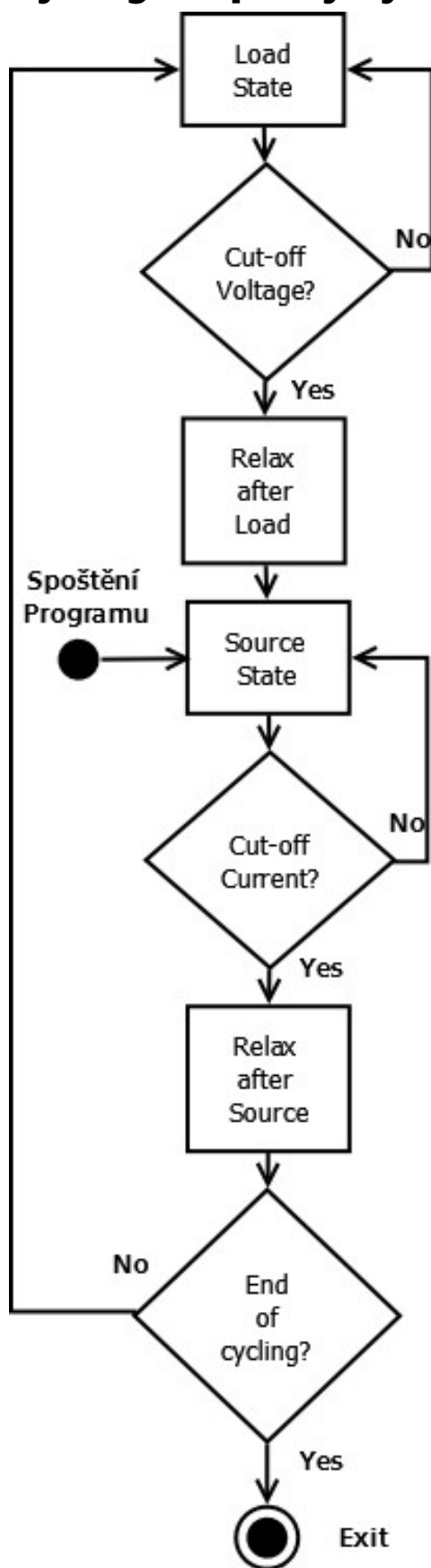
### B.2.1 Vzor souboru „Efficiency test results“

Date	19.4.2017	Start Time	13:39
Battery type	Lead Acid		
Capacity [mAh]			
Charge cycle	Discharge cycle	Efficiency [%]	
4,85	4,17	0,86	
5,47	5	0,91	

### B.2.2 Vzor souboru „0.1.LoadMeasurement“ „0.-číslo měření-. -typ měření – Measurement “

Date	19.4.2017	Start Time	13:31	
Battery type	Lead Acid			
Time [sec]	Time [HH:MM:SS]	Voltage [V]	Current [A]	Temp. Tk1 [°C]
3575446306	13:31:46	13,21	1	22
3575446309	13:31:49	13,12	1	22
3575446313	13:31:52	13,08	1	22
3575446316	13:31:55	13,06	1	22
3575446319	13:31:58	13,04	1	22
3575446322	13:32:02	13,02	1	22
3575446325	13:32:05	13	1	22
3575446328	13:32:08	12,98	1	22
Coulomb count [mAh]:		5,83		
Battery relax				
3575446329	13:32:08	13,01	0	22
3575446332	13:32:11	13,03	0	22

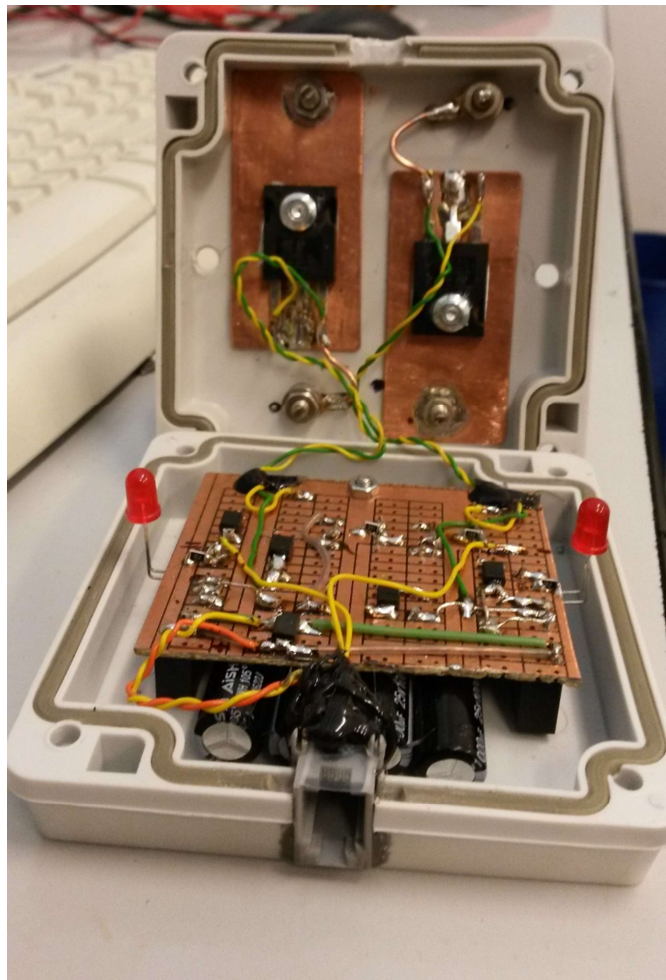
**B.3 Stavový diagram pro soubory**

**B.4 Vývojový diagram pro cykly článků**

## **C Druhá verze**

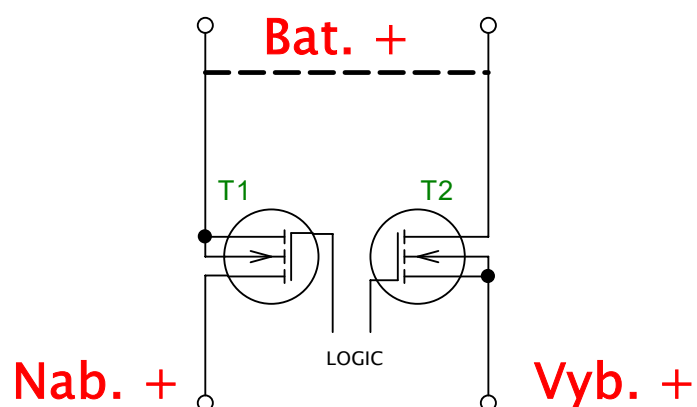
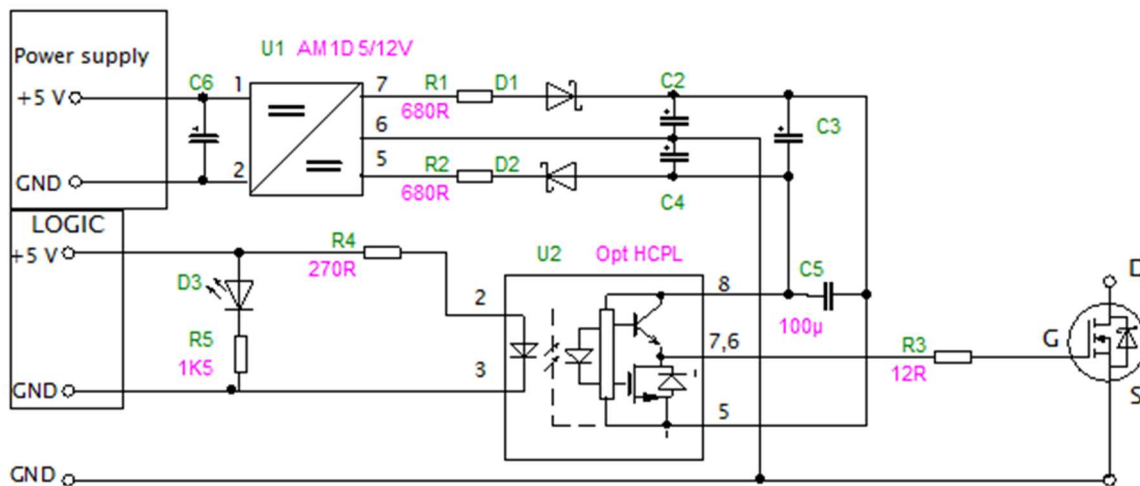
### **C.1 „Solid state relé“**

#### **C.1.1 Část obvodu**



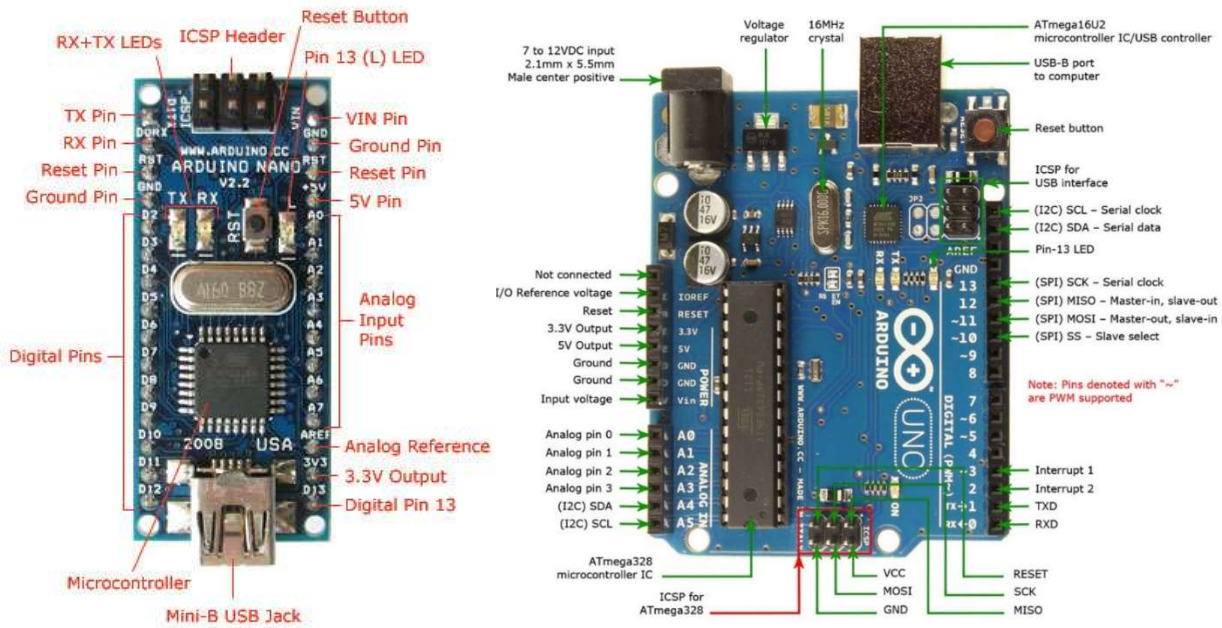


### C.1.2 Schéma zapojení

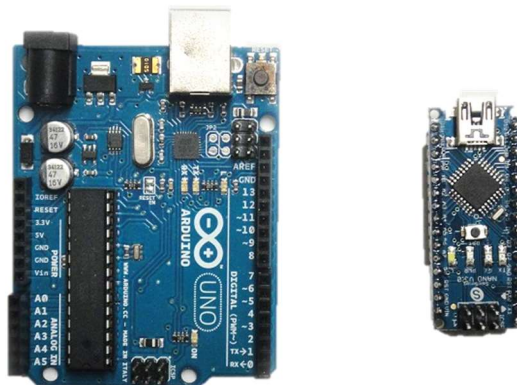


## C.2 Arduino

### C.2.1 Arduino UNO vs. Nano



### C.2.2 Porovnání velikostí



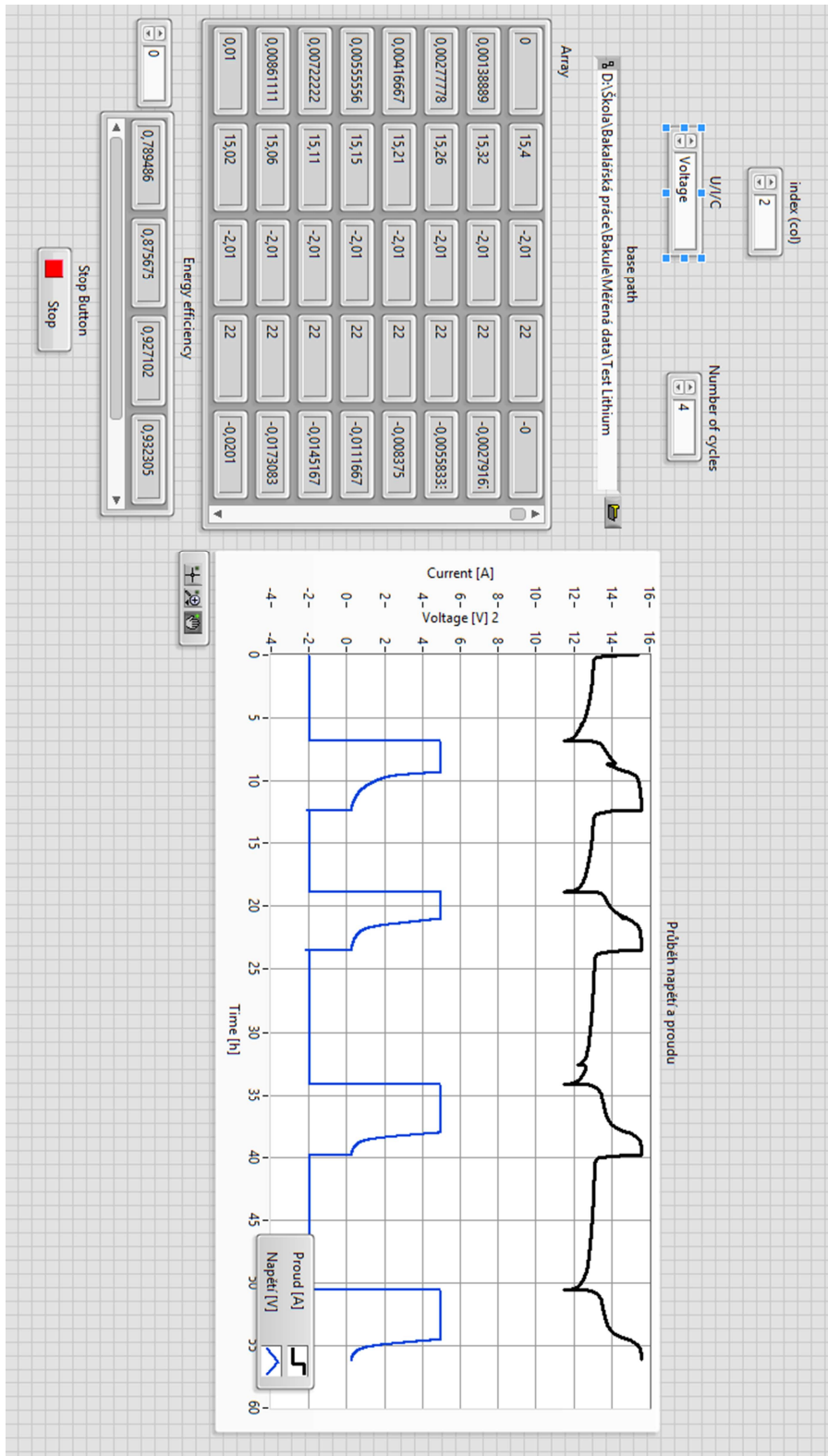
### C.2.3 Výsledný vzhled řídicí jednotky



### C.2.4 Finální sestava

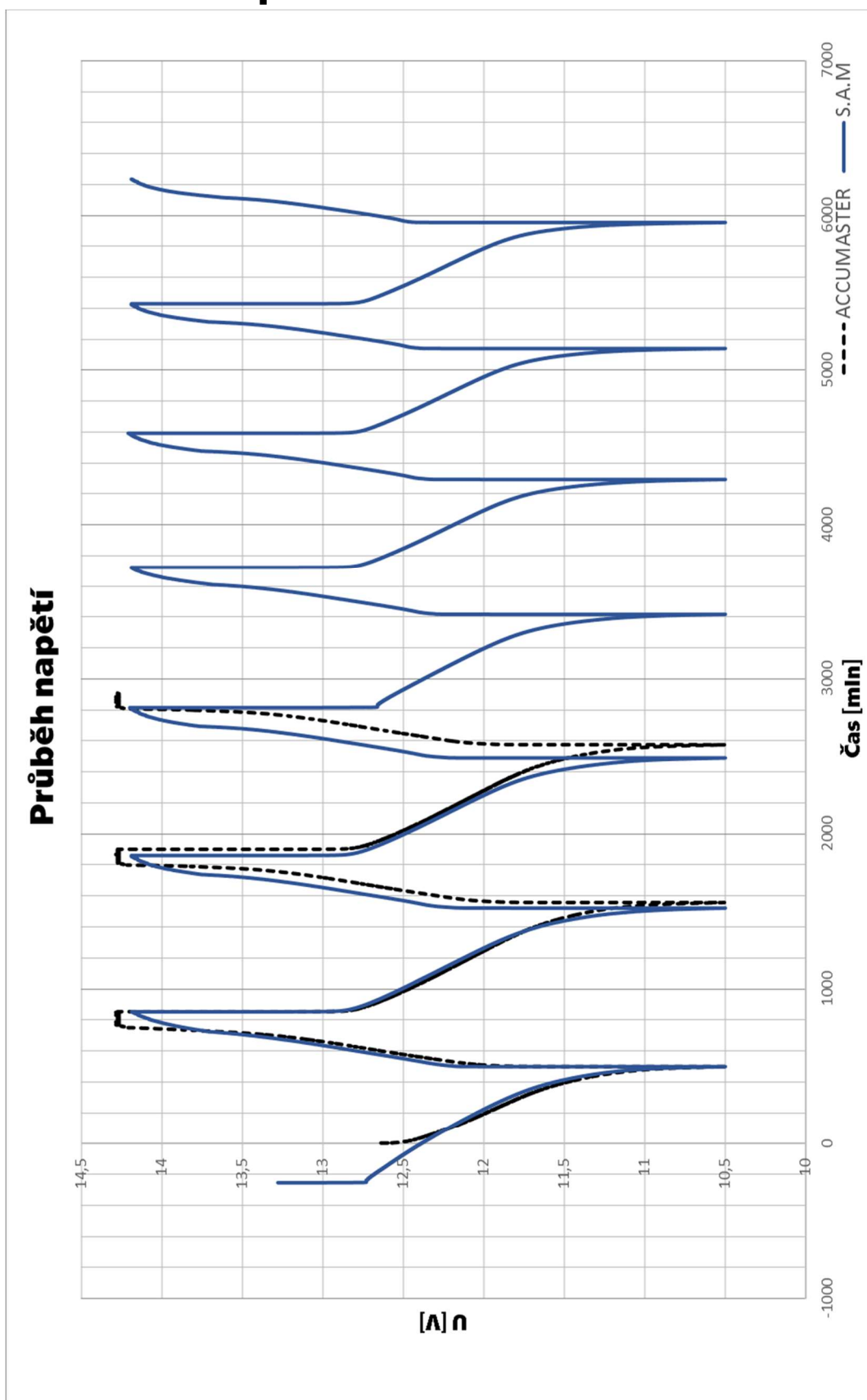


## C.2.5 Vyhodnocení v programu DataAdjust

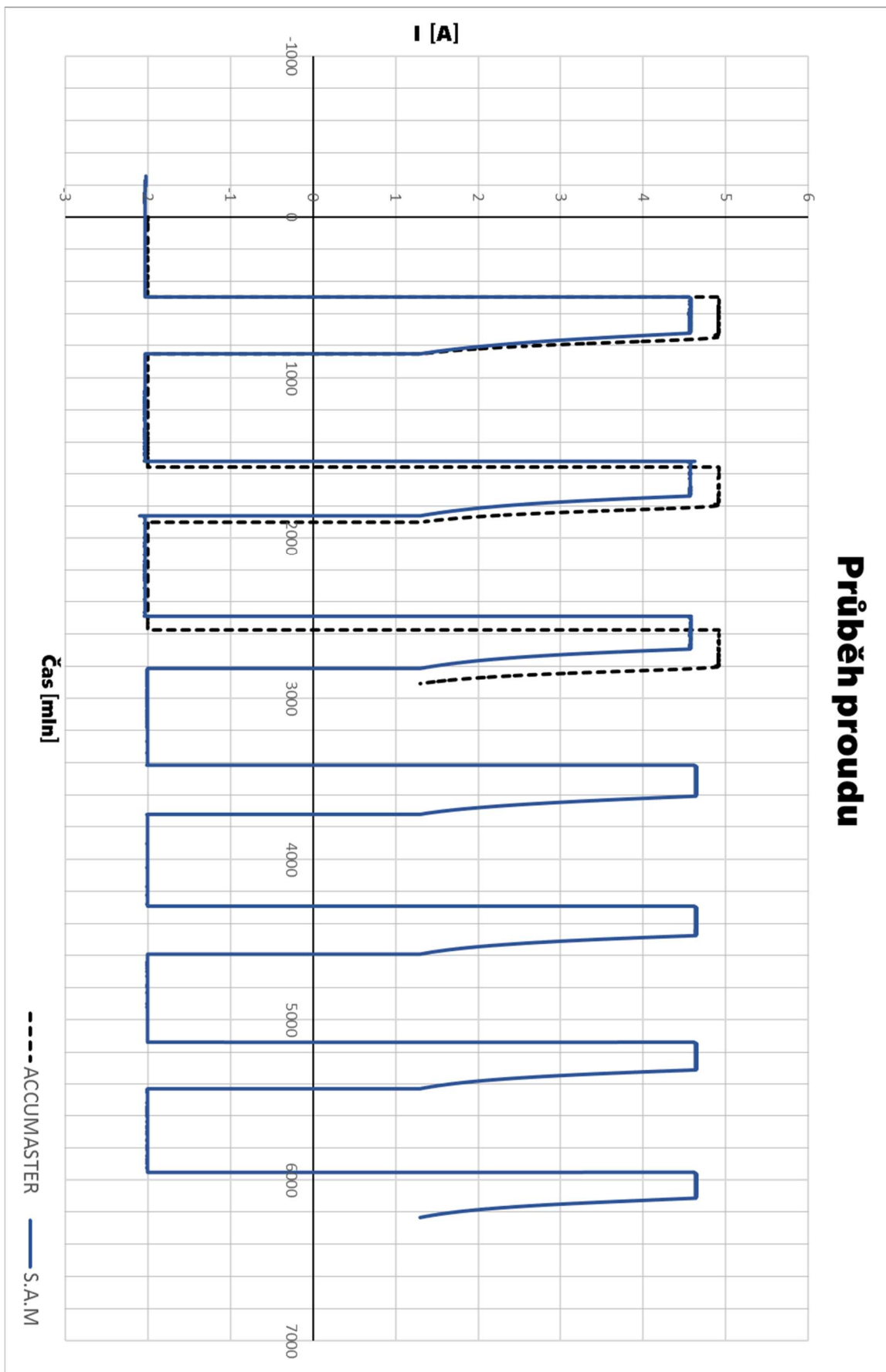


## D Série měření olověného akumulátoru

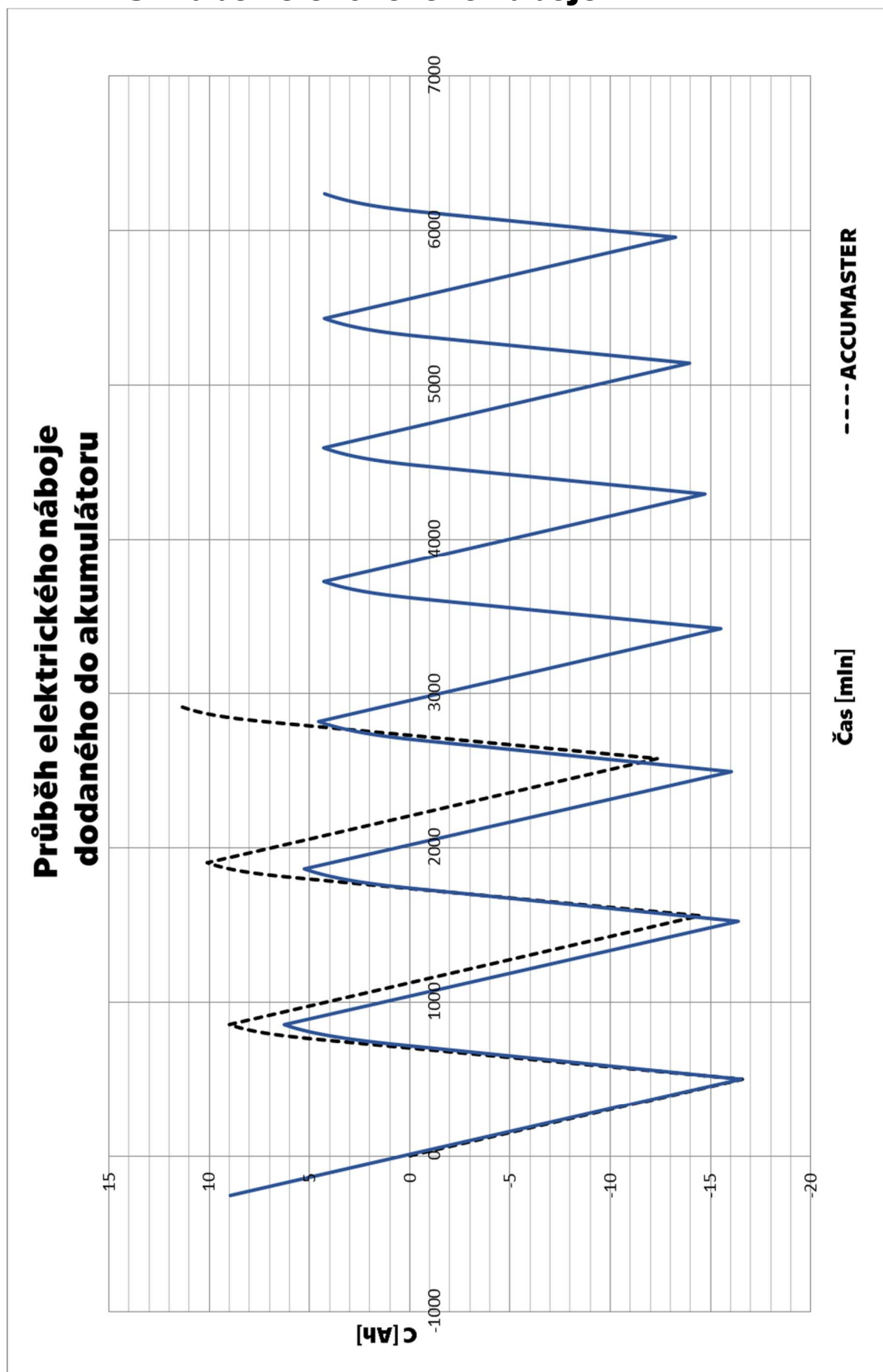
### D.1 Průběh napětí



## D.2 Průběh proudu



### D.3 Průběh elektrického náboje





## **E Příloha CD**

### **E.1 Programy pro labview**

#### **E.1.1 Hlavní řídicí program**

#### **E.1.2 Program pro čtení dat Data adjust**

### **E.2 Program pro mikroprocesor Arduino**

#### **E.2.1 Řízení relé**

#### **E.2.2 Řízení MOSFET**

### **E.3 Naměřená data v „.csv“**

### **E.4 Model krabičky pro 3D tisk**

### **E.5 Fotodokumentace**

### **E.6 Vývojové diagramy**

### **E.7 Technické listy k přístrojům**

### **E.8 Použitá literatura**

### **E.9 Použité grafy**

### **E.10 Bakalářská práce**