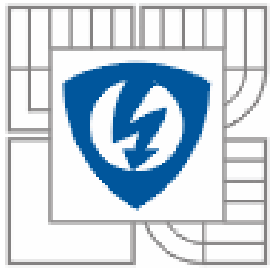




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

# **AUTOMATIZOVANÉ MĚŘICÍ PRACOVISŤE POKUSNÝCH ČLÁNKŮ OLOVĚNÉHO AKUMULÁTORU**

AUTOMATIZED MEASSURING APPARATUS FOR LEAD ACID BATTERY CELLS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**BC. IVO ČAPEK**

**VEDOUČÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. PETR KŘIVÍK, PH. D.**

**BRNO 2008**

# Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Ivo Čapek  
Bytem: Židovice 65  
Narozen/a (datum a místo): 31.1.1983, Hradec Králové

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
Prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Automatizované měřicí pracoviště pokusných článků  
olověného akumulátoru

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Petr Křivík, Ph.D.

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. 5. 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## Abstrakt:

Cílem této práce bylo vytvořit automatizované měřicí pracoviště pro měření článků olověného akumulátoru v režimu částečného nabití (PSoC - Partial State of Charge) a pro standardní cyklování. Hlavní zaměření práce je na vytvoření programu pro simulaci běhu olověného akumulátoru v hybridním elektrickém vozidle a programu pro simulaci běhu olověného akumulátoru v elektrickém vozidle. Programy jsou vytvořeny ve vývojovém prostředí VEE Pro. Vytvořené pracoviště slouží k výzkumu degradačních mechanismů zaplavených akumulátorů a VRLA (Valve Regulated Lead Acid) baterií. Výsledky výzkumu povedou k prodloužení životnosti těchto baterií a tím k úspoře životního prostředí.

## Abstract:

The aim of this work was to create automatized measuring system for measurement of lead acid batteries in PSoC mode and standard cycling. The general aim is to create program for simulating of lead acid battery run in hybrid electric vehicle and electric vehicle. Program was designed in developing software VEE Pro. Created system is made for identification of degradation mechanisms of flooded batteries and valve regulated lead acid batteries. Results of this research will lead to extension of batteries cycle life and preservation of environment.

## Klíčová slova:

Automatizované měřicí pracoviště, olověný akumulátor, experimentální článek, standardní režim, PSoC, RAPS, VRLA

## Keywords:

Automatized measuring apparatus, Lead Acid Battery, cells, experimental battery cells, standart mode, PSoC, RAPS, VRLA

Bibliografická citace díla:

ČAPEK, I. *Automatizované měřicí pracoviště pokusných článků olověného akumulátor.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. 5. 2008

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji s Doc. RNDr. Milanu Calábkovi, Csc. za poskytnutí prostoru k realizaci experimentálních prací.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektrotechnologie

### POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor: Bc. Ivo Čapek

Název závěrečné práce: Automatizované měřicí pracoviště pokusných článků olověného akumulátoru

Název závěrečné práce ENG: Automated measuring apparatus for lead acid battery cells

Anotace závěrečné práce: Předkládaná práce se zabývá vývojem automatizovaného pracoviště pro měření pokusných článků olověného akumulátoru. Základem je sestavení vlastního měřicího pracoviště a vytvoření programů pro cyklování článků ve standardním režimu a v režimu PSoC.

Anotace závěrečné práce ENG: This presented work deals with the development of an automated station for the measuring of experimental cells of the Lead Acid Battery. The principle is to design a measuring station and make programs for cycling of cells in standard and PSoC modes.

Klíčová slova: Automatizované měřicí pracoviště, olověný akumulátor, experimentální článek, standardní režim, PSoC, RAPS, VRLA

Klíčová slova ENG: Automated measuring apparatus, Lead Acid Battery, experimental battery cell, standard mode, PSoC, RAPS, VRLA

Typ závěrečné práce: diplomová

Datový formát elektronické verze: formát pdf

Jazyk závěrečné práce: český

Přidělovaný titul: Ing.

Vedoucí závěrečné práce: Ing. Petr Křivík, Ph. D.

Škola: Vysoké učení technické v Brně

Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav:	Ústav elektrotechnologie
Studijní program:	Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor:	Elektrotechnická výroba a management

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY</b> .....	<b>6</b>
2.1	PRINCIP ČINNOSTI OLOVĚNÉHO AKUMULÁTORU .....	8
2.2	KONSTRUKCE OLOVĚNÉHO AKUMULÁTORU .....	12
2.3	DEGRADAČNÍ MECHANISMY .....	15
2.3.1	<i>Expanze kladné elektrody</i> .....	15
2.3.2	<i>Vysoušení elektrolytu</i> .....	16
2.3.3	<i>Stratifikace kyseliny sírové</i> .....	16
2.3.4	<i>Neúplné nabíjení</i> .....	16
2.3.5	<i>Koroze</i> .....	17
2.4	VRLA BATERIE .....	17
<b>3</b>	<b>MĚŘICÍ PRACOVNÍ MÍSTO</b> .....	<b>22</b>
3.1	SLOŽENÍ JEDNÉ MĚŘICÍ JEDNOTKY .....	22
3.1.1	<i>Zapojení a princip funkce</i> .....	26
<b>4</b>	<b>MĚŘICÍ PROGRAM PRO CYKLOVÁNÍ ČLÁNKU V REŽIMU PSOC</b> .....	<b>28</b>
4.1	ZÁKLADNÍ SCHÉMA PROGRAMU PSOC .....	28
4.2	BLOKOVÉ SCHÉMA PROGRAMU .....	30
4.2.1	<i>Načtení hodnot předchozího měření</i> .....	32
4.2.2	<i>Zápis do souboru</i> .....	32
4.2.3	<i>Nabíjení článku</i> .....	34
4.2.4	<i>Vybíjení článku</i> .....	35
4.2.5	<i>Modul UPS</i> .....	36
4.2.6	<i>Článek odpojen</i> .....	37
<b>5</b>	<b>MĚŘICÍ PROGRAM PRO STANDARDNÍ CYKLOVÁNÍ</b> .....	<b>38</b>
5.1	ZÁKLADNÍ SCHÉMA PROGRAMU .....	38
5.1.1	<i>Ovládací panel programu</i> .....	40
5.1.2	<i>Modul nabíjení programu</i> .....	40
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>45</b>
6.1	GRAFY NAMĚŘENÝCH CHARAKTERISTIK.....	46
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>51</b>

# 1 Úvod

Cílem této práce je sestavit automatizované měřicí pracoviště pro měření experimentálních článků olověného akumulátoru. Dalším úkolem je vytvořit dva měřicí a simulační programy ve vývojovém prostředí VEE Pro. První program se zabývá cyklováním článku olověného akumulátoru v režimu částečného nabití (PSoC), kdy má program simulovat běh hybridního elektrického vozidla (HEV). Druhý program simuluje provoz trakčního akumulátoru v elektrickém vozidle (EV).

Celá práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. V první části se práce zabývá obecným seznámením s olověnými akumulátory. Jsou zde uvedeny základy konstrukce olověného akumulátoru a je zde vysvětlen princip jeho funkce. Dále jsou zde popsány jednotlivé degradační mechanismy, které postihují jak klasické zaplavené akumulátory, tak i VRLA baterie, pracující v režimu PSoC.

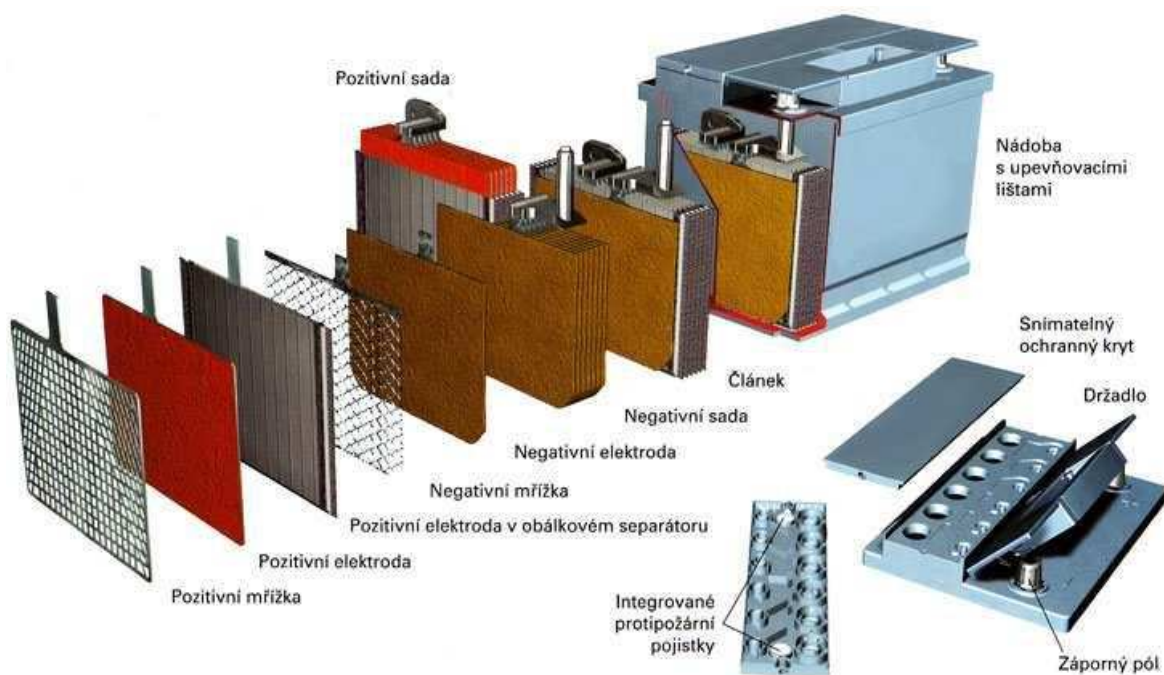
Ve druhé části projekt popisuje zapojení celého pracoviště. Jsou zde popsány jednotlivé přístroje použité pro měření. Je zde uvedeno podrobné schéma zapojení a popsání funkce celého měřicího pracoviště.

Třetí část projektu popisuje dva vytvořené programy pro cyklování článků olověného akumulátoru. Jsou zde vývojové diagramy celých programů, i některých klíčových částí, pro jednodušší pochopení programu.

Poslední experimentální část této práce ukazuje naměřené grafy jednotlivých experimentů a to cyklování v režimu PSoC i standardního cyklování. Vlastní získání těchto grafů zobrazuje funkčnost měřicích programů i celého pracoviště.

## 2 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory jsou nejpoužívanější sekundární zdroje proudu [1]. V současné době představují asi 60% všech prodávaných baterií v celosvětovém měřítku. Vyrábějí se o kapacitách řádově od 1 do 10000 Ah. Důvodem jejich rozšíření je dobře zvládnutá technologie výroby, relativně nízké náklady na jejich výrobu a dobrá účinnost i dostatečný výkon [3]. Díky těmto vlastnostem je v současnosti olověný akumulátor nejpoužívanějším sekundárním zdrojem elektrické energie. Vzhledem ke své perspektivnosti (zejména v automobilovém průmyslu) se počítá s jeho dalším zdokonalováním. Mezi jeho nevýhody ovšem patří zejména velká hmotnost olova a s tím související nižší měrná energie. Na **Obr. 2.1** je vidět podrobné složení automobilové baterie.



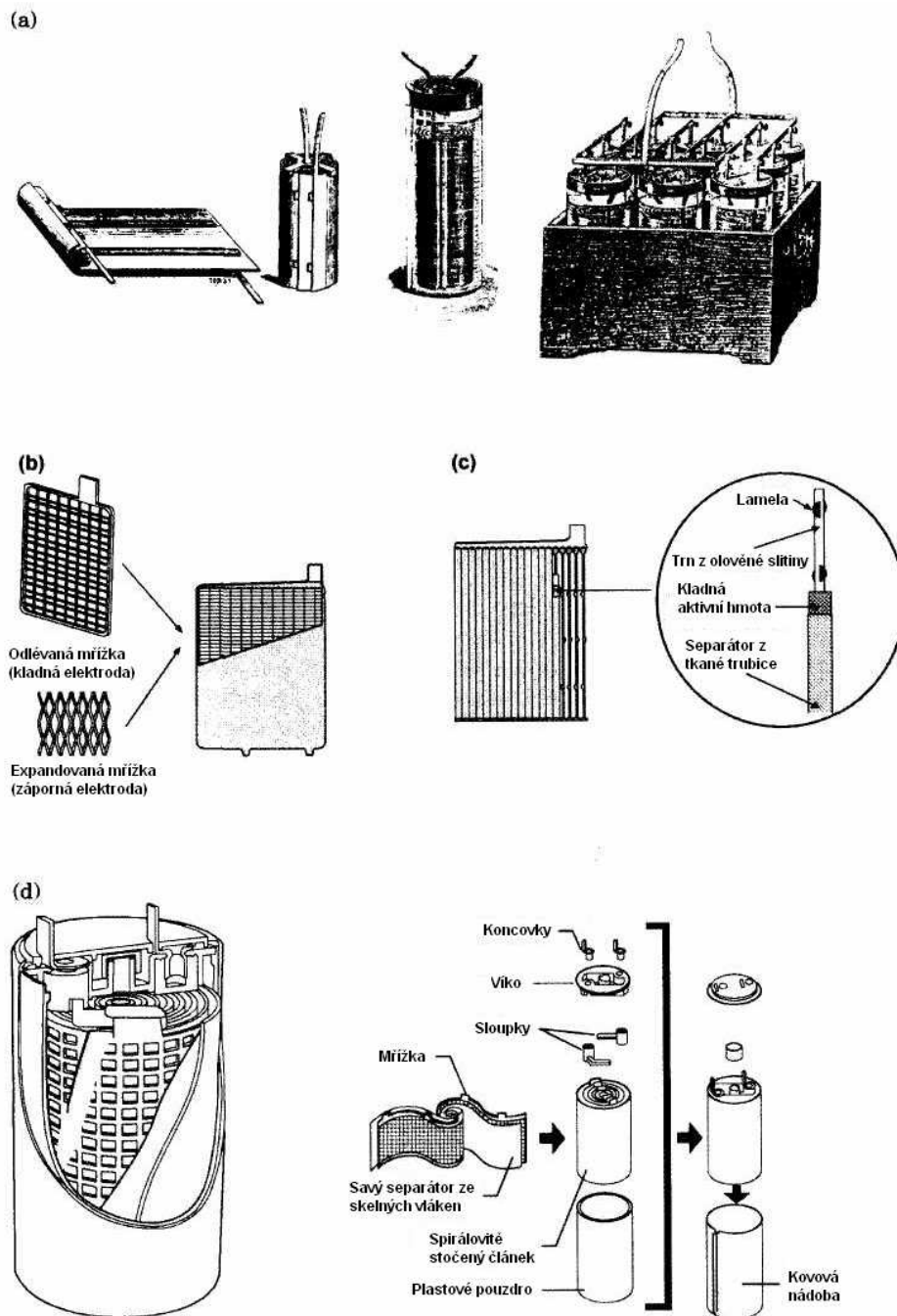
**Obr. 2.1** Celková sestava olověného akumulátoru (autobaterie)

Olověné baterie jsou používány v mnoha aplikacích a na jejich vlastnosti a pracovní cyklus jsou kladeny různé požadavky [1], [2]. Startovací olověné akumulátory musí poskytnout krátký impuls vysokého proudu ve vozidlech se spalovacím motorem

k nastartování motoru. Malý ustálený proud pro provoz elektroniky pokud motor neběží, proto baterie zůstává většinu času svého provozu ve stavu vysokého nabití. Staniční baterie pro záložní účely (v telekomunikačních aplikacích, jaderných elektrárnách) zůstává podobně jako startovací akumulátor ve stavu vysokého nabití. Akumulátor je jen zřídka vybíjen. Zde je kladen velký důraz na životnost akumulátoru, která se pohybuje okolo dvaceti let. Na rozdíl od staničních a startovacích akumulátorů podstupuje baterie v hybridním elektrickém vozidle (HEV) hluboká vybití a opětovná nabití v periodě několika hodin. Do této kategorie olověných akumulátorů patří baterie v hybridních elektrických vozidlech a baterie určené pro vzdálenou dodávku energie (RAPS - Remote Area Power Supply Systems). Baterie v těchto aplikacích jsou většinu času ve stavu částečného nabití (PSoC - Partial State of Charge). Baterie jsou nabitý zhruba na 50 % své maximální kapacity.

Ve výše zmíněných případech musí baterie dodat adekvátní energii [2]. To může být vážnější požadavek pro baterie v EV a HEV než pro baterie v RAPS systémech, založených na solární energii. Baterie určené pro mobilní aplikace musí být co nejlehčí, v podstatě by baterie měla mít vysokou specifickou energii, tj. vysoký energetický výkon na jednotku hmotnosti Wh/kg. Vysoká nabíjecí účinnost (náboj odevzdaný při vybíjení / náboj dodaný při nabíjení) je také významný parametr šetřící primární energii.

První kdo oznámil, že se dá získat elektrický proud z dvojice olověných desek ponořených do kyseliny sírové a podrobeny nabíjení, byl Gaston Plante (1834-1889). Nejznámější typy elektrod jsou tzv. deskové elektrody, které jsou vyráběny napastováním oxidů olova a kyseliny sírové na olověnou mřížku. Nejnovější články pro výkonové aplikace jsou uspořádány tak, že kladná a záporná elektroda je od sebe oddělena separátorem ze skleněných vláken a elektrody jsou smotány do válce (spirálová konstrukce). Tento design se velice podobá prvním návrhům Plantého. Typy desek jsou vidět na **Obr. 2.2**.



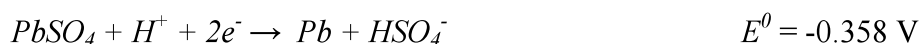
**Obr. 2.2** (a) článek a baterie Gastona Planteho; (b) plochá deska; (c) trubková kladná deska; (d) spirálově stočený článek [2].

## 2.1 Princip činnosti olověného akumulátoru

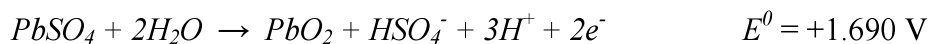
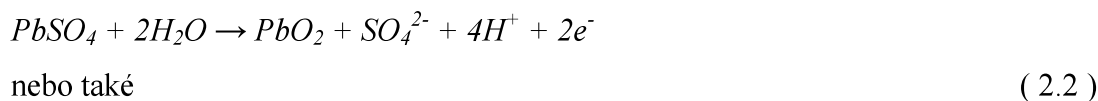
Jestliže ponoříme dvě olověné desky do zředěné kyseliny sírové, začnou probíhat následující děje [2]:

- ve vodném roztoku jsou disociovány molekuly kyseliny sírové  $H_2SO_4$  na anionty  $SO_4^{2-}$ ,  $HSO_4^-$  a kationty  $H^+$ ,
- z olověných desek se uvolňují dvojmocné kationty olova  $Pb^{2+}$  a desky samotné tak získávají stejný záporný náboj,
- v blízkosti desek se kationty olova a anionty  $SO_4^{2-}$  slučují na síran olovnatý  $PbSO_4$ , který na nich vytvoří vrstvu.

Napětí na deskách je nulové, z toho plyne, že článek je zatím nenabitý. K destičkám se připojí zdroj stejnosměrného napětí a začne probíhat elektrolýza (**Obr. 2.3**). Kationty  $H^+$  se začnou pohybovat k destičce připojené k zápornému pólu a anionty  $HSO_4^-$  a  $SO_4^{2-}$  ke kladnému pólu. Na záporné elektrodě začne probíhat reakce popsaná chemickou rovnicí



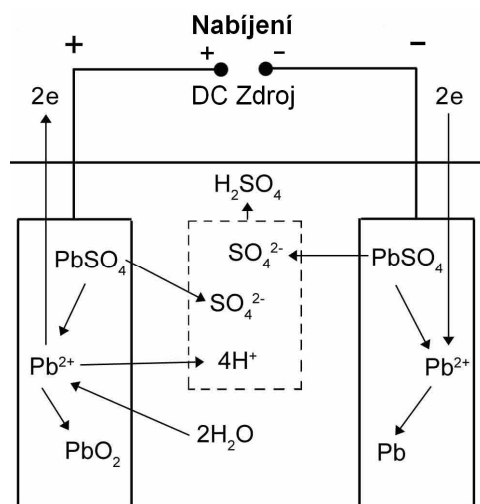
a na kladné elektrodě



Celková reakce v akumulátoru je popsána chemickou rovnicí



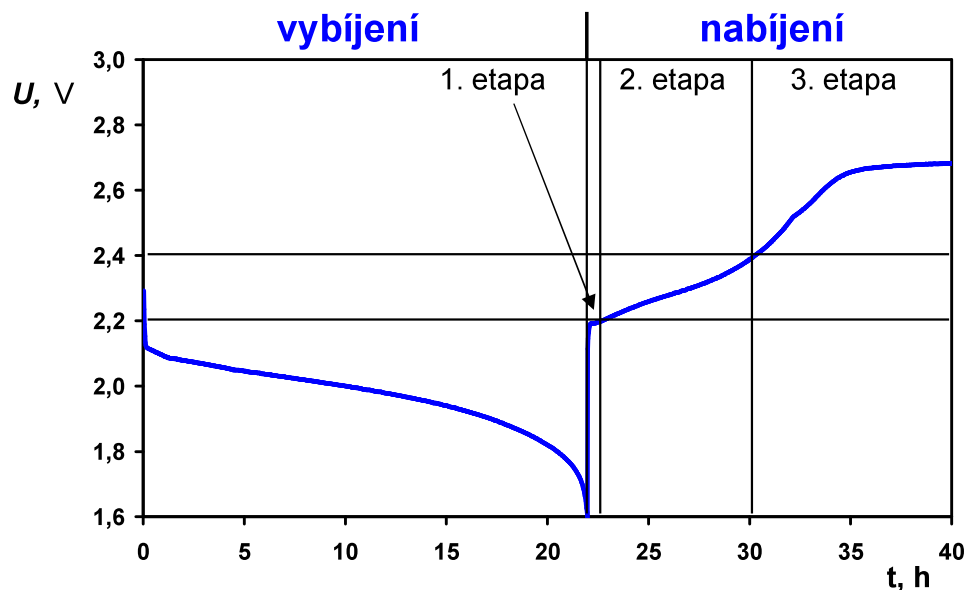
šipka vlevo označuje vybíjení a vpravo nabíjení.



**Obr. 2.3** Nabíjení olověného akumulátoru [2]

Během nabíjení se v roztoku vytvářejí další molekuly kyseliny sírové a elektrolyt houstne (zvyšuje se obsah  $H_2SO_4$  v elektrolytu – kyselina sírová má větší hustotu než voda) [2]. Když se nabíjení ukončí, vznikne článek, který má zápornou elektrodu potaženou vrstvou houbovitého olova. Kladná elektroda je potažena červenohnědým oxidem olovičitým. Napětí takového článku je v rozmezí 2,0 - 2,1 V. Množství látek obsažených v elektrolytu a vyloučených na elektrodách zůstává nezměněno. Vložená elektrická energie se přeměnila na energii chemickou.

Správné nabíjení akumulátoru je velice důležité, jelikož celé nabíjení olověného akumulátoru probíhá ve třech etapách (**Obr. 2.4**) [2]. První etapa nastává po připojení napájecího zdroje k článku. Tato etapa je charakterizována strmým nárůstem napětí (v oblasti od 1,75 – 2,2 V) vyvolaným rychlou tvorbou molekul  $H_2SO_4$  v pórech obou olověných desek. V této etapě stoupne hustota elektrolytu z 0,95 g/cm<sup>3</sup> až na 1,15 g/cm<sup>3</sup>. Druhá etapa je charakterizována dalším pozvolným nárůstem napětí v rozmezí od 2,2 do 2,4 V. Hustota elektrolytu vzroste na 1,25 g/cm<sup>3</sup> (článek je již téměř nabit). Jestliže se nyní neodpojí napájecí zdroj, začne se kromě  $PbSO_4$  rozkládat i voda a článek začne plynovat (3. etapa). Až se dokončí přeměny síranu, napětí článku vzroste na 2,7 – 2,8 V. Další dodávaná energie se spotřebuje jen na elektrolýzu vody, což způsobuje prudké plynování a napětí na článku již nenarůstá [2].

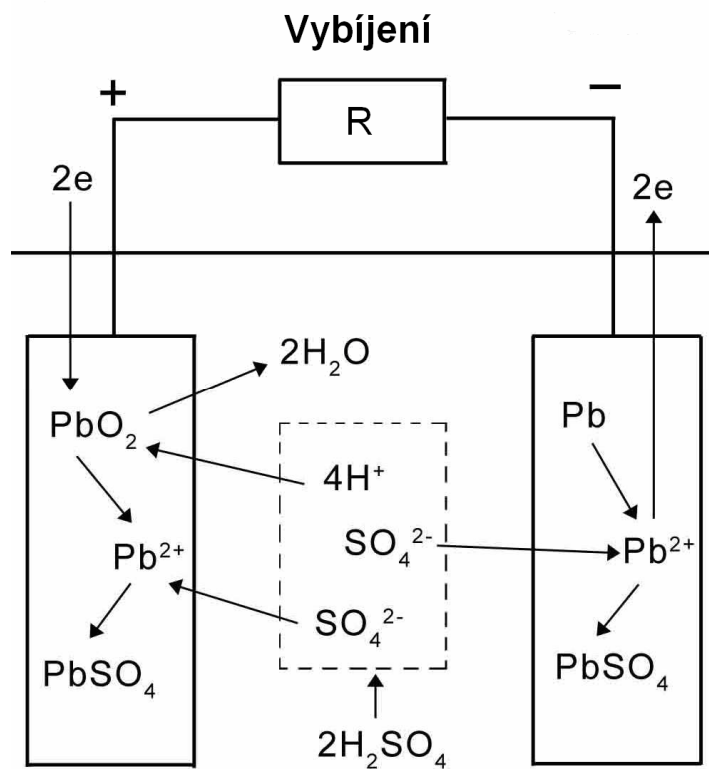


**Obr. 2.4** Nabíjení a vybíjení olověného akumulátoru [2]

Ke konci nabíjení se přemění téměř všechny síran a na záporné elektrodě se začne vyvíjet vodík. Na kladné elektrodě se uvolňuje malé množství kyslíku v průběhu celého nabíjení. Plynování článku způsobí snížení kapacity elektrody na 85 až 90%, proto k získání plné vybíjecí kapacity se musí dodat po vzrůstu napětí ještě další náboj (10 až 20% kapacity). Toto přebíjení je ovšem doprovázeno mohutným vývinem kyslíku a vodíku. Mohutné plynování je pro akumulátor nepříznivé a výrazně snižuje jeho životnost. Proto je nutné plynování omezit například úpravou nabíjecího režimu. Místo nabíjení konstantním proudem je lepší použít nabíjení s napěťovým omezením o velikosti blízké plynovacímu napětí okolo 2,45 V. To má za následek zvýšení elektrochemické účinnosti na 95 – 99% a výrazně vzroste i životnost akumulátoru.

Pokud ke svorkám článku připojíme spotřebič (**Obr. 2.5**), začne jím protékat elektrický proud. Na obou elektrodách probíhají opačné reakce než při nabíjení. Na záporné elektrodě oxiduje olovo a na kladné elektrodě dochází k jeho redukcí. Aktivní hmota (polovodič oxidového typu oxid olovičitý  $PbO_2$  na kladné elektrodě; houbovitě olovo  $Pb$  na záporné elektrodě) reaguje s kyselinou sírovou, přičemž se elektrody začnou pokrývat vrstvou nevodivého síranu olovnatého  $PbSO_4$  a elektrolyt řídne [1], [2], [3].

Obě vybíjecí reakce jsou doprovázeny expanzí aktivní hmoty. Nárůst objemu po transformaci  $PbO_2$  na  $PbSO_4$  je 92 %, zatímco po transformaci  $Pb$  na  $PbSO_4$  164 %.



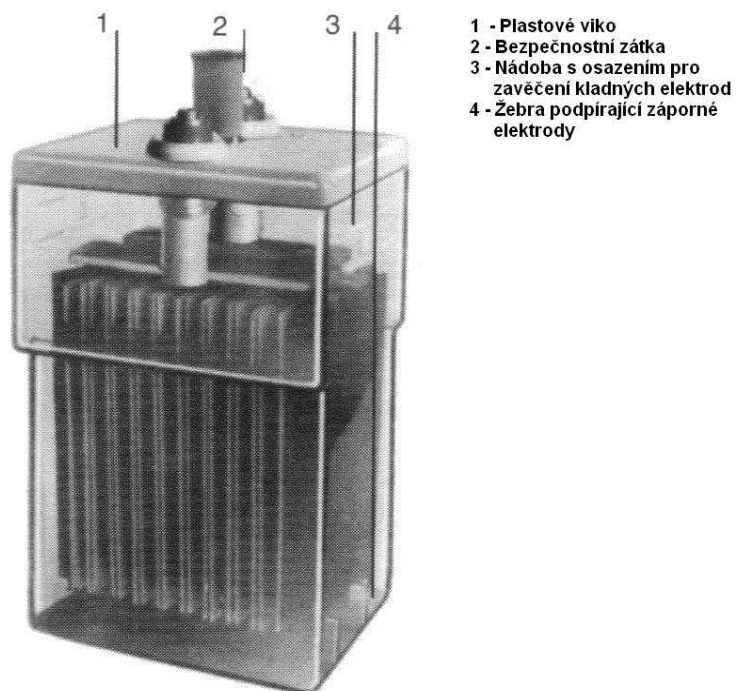
**Obr. 2.5** Vybíjení olověného akumulátoru

## 2.2 Konstrukce olověného akumulátoru

Skutečný olověný akumulátor bývá sestaven z několika článků, které jsou zapojeny do série. Konstrukce akumulátoru je podstatně složitější a závisí na jeho konkrétním využití [1], [2]. Podle této specifické konstrukce se akumulátory dělí na staniční, trakční a startovací.

Staniční baterie jsou trvale dobíjeny a zajišťují nepřerušované napájení elektrickou energií v případě výpadku napětí rozvodné sítě. Během své životnosti prodělají jen malý počet cyklů. Životnost akumulátorů se udává v rocích.

Staniční akumulátory se vyrábějí v rozsahu kapacit od 1 Ah do 10000 Ah. Životnost staničních akumulátorů se pohybuje v rozsahu 10 až 20 let ve stavu stálého nabití. Příklad staničního akumulátoru je na **Obr. 2.6**.

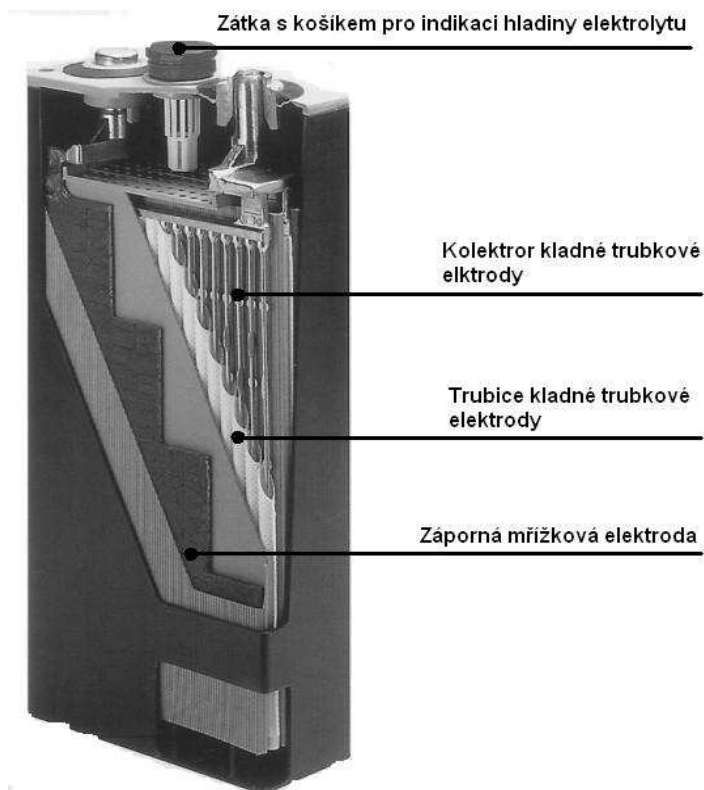


**Obr. 2.6** Příklad staničního akumulátoru

Trakční baterie se používají například k pohonu plošinových a zvedacích vozíků, elektromobilů apod. Pracují v cyklickém provozu nabíjení – vybíjení. Životnost těchto akumulátorů se uvádí v počtu cyklů nabití – vybití.

Podle velikosti se rozlišují [1], [2] akumulátory pro malou a velkou trakci. Podle konstrukce kladných elektrod rozlišujeme trakční akumulátory s trubkovými a mřížkovými elektrodami. V malé trakci se používají akumulátory s kapacitou od 12 do 180 Ah, dodávané v bateriových monoblocích o napětí 6-12 V. Vnější provedením odpovídají baterie malé trakce startovacím akumulátorům. Pro velkou trakci se vyrábějí články o napětí 2 V a kapacitách přibližně od 110 do 1500 Ah. Články se propojují v baterie o napětí 24, 48 a 80 V. Trakční akumulátory s kladnými trubkovými elektrodami jsou nejrozšířenější. Dosahují více jak 1000 cyklů nabití-vybití, než jejich kapacita poklesne na 80 %. Mřížkové elektrody trakčních akumulátorů se svou konstrukcí podobají mřížkovým elektrodám startovacích akumulátorů, mají ale větší plochu a přibližně dvojnásobnou tloušťku. Trakční akumulátory s mřížkovými elektrodami jsou levnější než s kladnými elektrodami trubkovými, ale jejich životnost v cyklech je nižší. Adhezi aktivní hmoty zlepší velký obsah antimonu (9 až 10 %) v

mřížce elektrody. Zvýší se tím samovybíjení, ale u trakčních akumulátorů to příliš nevadí. Příklad trakčního akumulátoru je na **Obr. 2.7**.



**Obr. 2.7** Trakční článek s kladnými trubkovými elektrodami

Startovací akumulátory slouží jako zdroj elektrické energie ke spouštění spalovacích motorů [3]. Jejich provoz je charakteristický tím, že jsou krátce (několik sekund) vybíjeny vysokými proudy, kdy se vybije jen zlomek jejich kapacity a pak jsou po dobu provozu motoru nabíjeny tak, aby byly udržovány v téměř nabitém stavu. K hlubokému vybití dochází výjimečně.

Za normálních podmínek pracují startovací akumulátory ve vyrovnávacím režimu. Po vybití malé části kapacity, potřebné k nastartování motoru se baterie dobíjí alternátorem. Příklad klasické autobaterie je na **Obr. 2.1**. Porovnání staničních, trakčních a startovacích akumulátorů je v **Tabulce 2.1**.

**Tabulka 2.1** Charakteristiky Olověných akumulátorů [2]

Typ akumulátoru	Měrná energie [W.h.kg <sup>-1</sup> ]	Životnost v cyklech	Doba provozu v rocích
Startovací	26 až 28	100 až 300	2 až 4
Trakční	20 až 28	800 až 1500	4 až 6
Staniční	8 až 12	-	10 až 20

### 2.3 Degradáční mechanismy

Běžn  baterie s voln m elektrolytem (zaplaven  konstrukce) trpí jedním nebo více z n ze uvedených pěti degradačních mechanismů. S pomocí několika zásad uvedených u jednotlivých degradačních mechanismů bylo dosaženo zvyšeni životnosti baterií s voln m elektrolytem [2].

#### 2.3.1 Expanze kladn  elektrody

Tento degradační mechanismus se vyskytuje v rovině desky (mřížka je postupně roztahována rostoucí korozní vrstvou) i ve směru kolm m na rovinu desky (expanze vlastní aktivní hmoty). Nabíjení a vybíjení způsobuje expanzi aktivního materiálu, jelikoř pevn  produkt vybíjecí reakce  $PbSO_4$  zabírá v tř i objem neř aktivní hmoty ( $PbO_2$ ). Kdyř se článek nabije, obnov  se v tř ina  $PbO_2$ , ale ne do původního objemu.

Naproti tomu z porn  elektroda neexpanduje stejn  (olovo je m kk i neř oxid olovičitý a proto je aktivní materiál snadněji komprimovateln ). V průběhu cyklování roste expanze kladn  elektrody a to způsobuje rostoucí separaci zrn aktivního materiálu ař do mezn ho stavu. Jednotliv  ústřice aktivní hmoty jsou elektricky odd len  a aktivní hmoty jiř neni schopn  dalř ch reakcí [2].

**Minimalizace:** růst v rovině desky se zpomalí použit m slitiny olova a antimonu (zv tř i se mez te eni). Trubkov  kladn  elektrody mají separátory ve tvaru úzkých dlouhých trubiček, kter  zabrání aktivní hmotě v expanzi a postupnému odpadávání. Pro deskov  uspořádání expanze kladn  elektrody může být zmírněna aplikací komprese na skupinu desek.

### 2.3.2 Vysoušení elektrolytu

Při přebíjení dochází k vyloučení vodíku a kyslíku, které redukuje objem elektrolytu tak, že část aktivní hmoty ztratí spojení s kapalným elektrolytem. Při použití zaplavené konstrukce vodík a kyslík uniká, což způsobuje úbytek vody. Tento proces se dále urychluje, vysychání elektrolytu zvětšuje vnitřní odpor článku. Vyšší vnitřní odpor způsobuje přehřívání článku a tím se odpařuje stále více vody [2].

**Minimalizace:** vysoušení elektrolytu se minimalizuje periodickým doplňováním destilované vody do článku.

### 2.3.3 Stratifikace kyseliny sírové

Při nabíjení je tvořena kyselina sírová uvnitř a mezi deskami elektrod - v těchto místech má kyselina větší koncentraci a tím i hustotu a tudíž se usazuje ve spodní části článku (**Obr. 2.8**).

Vytvoření vertikálního koncentračního gradientu kyseliny může zapříčinit nestejně využití aktivního materiálu a následkem toho se zkracuje životnost článku vytvářením nevratné formy  $PbSO_4$  (tzv. nevratná sulfatace) [2].

**Minimalizace:** stratifikace kyseliny sírové může být odstraněna promícháváním kyseliny pomocí záměrného plynování během prodlouženého přebíjení baterie.

### 2.3.4 Neúplné nabíjení

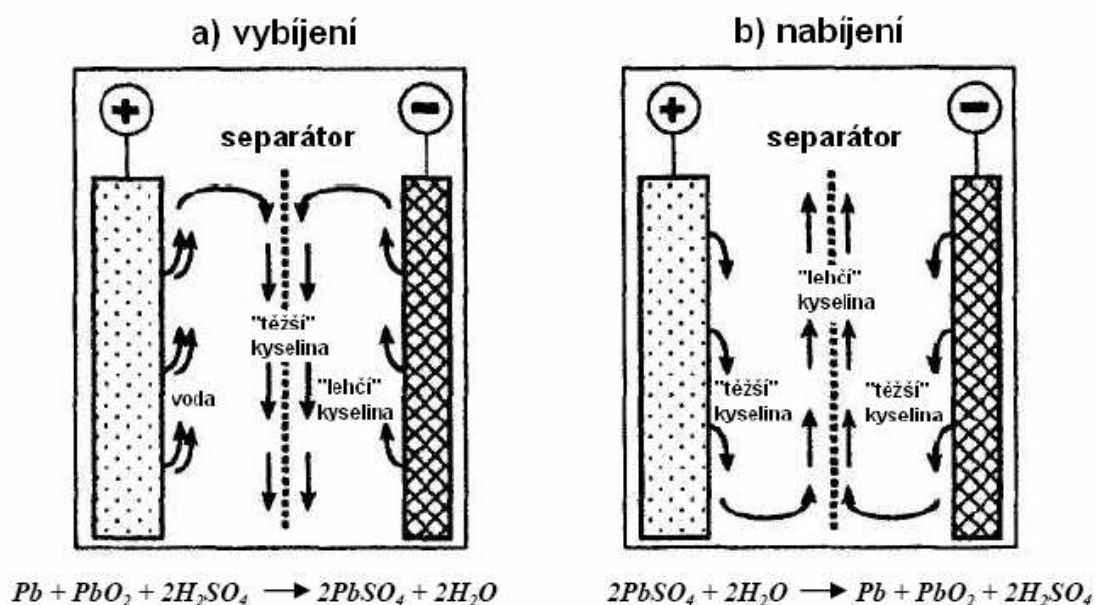
Pokud je některá z elektrod opakovaně nedostatečně dobíjena, dochází k rychlému poklesu kapacity baterie. Tento efekt způsobuje většinou špatný nabíjecí režim, nebo jde o následek fyzikálních změn, které brání elektrodě dosáhnout adekvátního potenciálu [2].

**Minimalizace:** Baterie pracující v režimu PSoC (v hybridních elektrických vozidlech (HEV) a v akumulacích jednotkách pro systémy vzdálené dodávky energie (RAPS)) vyžadují pro udržení své kapacity periodické cykly úplného nabití.

### 2.3.5 Koroze

Mřížka kladné elektrody koroduje. Rychlost tohoto degradačního procesu je ovlivněna následujícími parametry: složení mřížky, mikrostruktura mřížky, potenciál kladné elektrody, složení elektrolytu, teplota. Korozní produkty mají vyšší elektrický odpor než mřížka, tím klesá výkon baterie. V krajních případech koroze způsobí rozpad mřížky a zhroucení kladné desky [2].

**Minimalizace:** Koroze mřížky kladné elektrody je nejvíce ovlivněna způsobem nabíjení, řešení může být úpravou nabíjecího režimu, dále nalezením vhodné slitiny olova, jako možné přísady se jeví antimon, cín a vápník v různém poměru. Jednotlivé zastoupení příměsí se volí experimentálně s cílem dosáhnout maximální korozní odolnosti.



**Obr. 2.8** Schématické znázornění procesů a toku elektrolytu, které přispívají ke stratifikaci kyseliny sírové během (a) vybíjení a (b) nabíjení [2]

### 2.4 VRLA baterie

Ventilem řízený akumulátor [1], [2], [3] (VRLA - Valve Regulated Lead Acid) je výsledkem výzkumu, který měl za úkol vytvořit bezúdržbovou baterii. Do tohoto typu článku se nemusí dolívat destilovaná voda a článek neplynuje. Jedním příkladem tohoto typu článku je akumulátor SLA (Sealed Lead Acid Battery) (**Obr. 2.9**). Tento akumulátor má mřížkové

elektrody, elektrolyt o hustotě  $\rho = 1,3 \text{ g.cm}^{-3}$  je nasáknut v separátorech ze skleněných mikrovláken. Vnitřní odpor článku se pohybuje kolem  $0,5 \text{ m}\Omega$ . To umožňuje jeho vybíjení vysokými vybíjecími proudy.

VRLA baterie je v současné době jediný typ olověného akumulátoru využívaným v režimu PSoC.



**Obr. 2.9** Konstrukce malých ventilem řízených akumulátorů

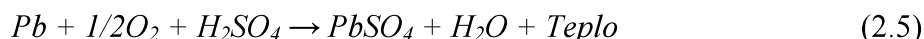
První komerčně nasazené VRLA baterie se objevili v 60. letech 20. století a byli navrženy firmou Sonnenschein GmbH, v 70. letech se objevily baterie od firmy Mates Energy Products, Inc., které měly elektrolyt ve formě gelu a separátory z absorbující skelné rohože.

VRLA baterie je navržena k tomu, aby pracovala v režimu tzv. vnitřního kyslíkového cyklu (nebo cyklu kyslíkové rekombinace) [2], viz **Obr. 2.10**.

Kyslík uvolňovaný v pozdějších fázích nabíjení a během přebíjení kladné elektrody podle rovnice [2]



se dostává přes plynové póry v separátoru k záporné elektrodě, kde je redukován (rekombinován) na vodu:



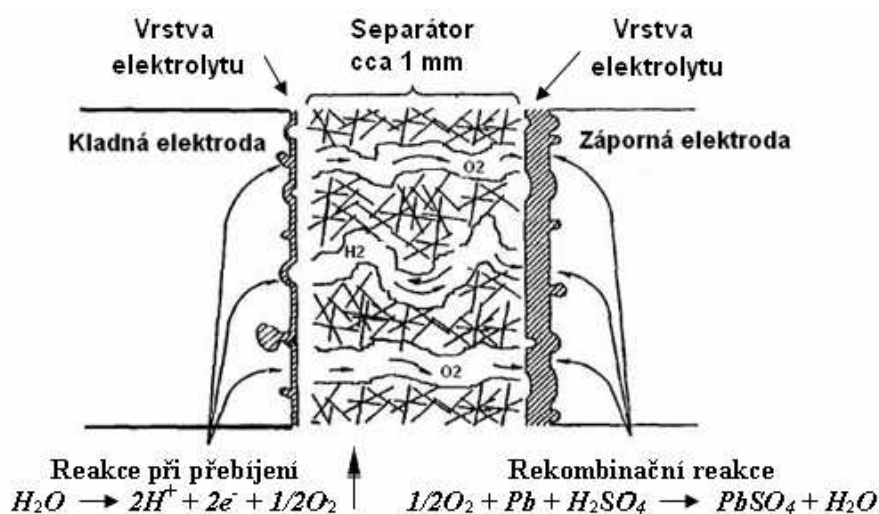
Do úvahy se musí vzít další dvě reakce, které se uplatňují při nabíjení VRLA článku. Tyto jsou vyvíjení vodíku na záporné elektrodě:



a koroze na kladné mřížce:



Je patrné, že nabíjení VRLA baterie je složitější než nabíjení zaplaveného článku. Při nabíjení VRLA baterie se spouští šest oddělených reakcí: dvě nabíjecí (2.1) a (2.2) a čtyři sekundární reakce (2.4) až (2.7)



**Obr. 2.1** Vnitřní kyslíkový cyklu VRLA baterie [2]

Kyslíkový cyklus [2] (rovnice (2.4) a (2.5)) posouvá potenciál záporné elektrody k méně negativním hodnotám a tím dochází k poklesu rychlosti vývoje vodíku (v porovnání se zaplaveným typem baterie). Přetlakový ventil zabezpečí, že i malé množství vodíku vyprodukované během nabíjení nezpůsobí vysoký tlak uvnitř baterie - proto je užíván termín: “ventilem řízený“. Jelikož je elektroda současně nabíjena, vytvářený síran olovnatý je ihned

redukován na olovo podle reakce (2.1). To obnovuje chemickou rovnováhu v článku, tj. výsledná suma reakcí (2.4), (2.5) a reakce (2.1) je nulová. Část elektrické energie dodávané do článku je spotřebována na cyklus kyslíkové rekombinace a je převedena na teplo.

Pokud se zajistí optimální velikost přebíjecího proudu, tak nabíjecí a rekombinační reakce zůstávají v rovnováze a uvolňuje se jen velmi malé množství plynu. Pokud je efektivita rekombinace vysoká a je nulový únik kyslíku z článku, je potom rychlost vývinu vodíku kompenzována rychlostí koroze mřížky kladné elektrody. Následné nabíjení baterie pracující v režimu cyklování s hlubokým vybíjením je komplikovanější, jelikož relativní kinetika několika soupeřících reakcí se mění s tím, jak baterie postupně dosahuje plného nabití. Pokud nabíjení neprobíhá korektně, nabíjecí proud může být ustavičně spotřebováván prostřednictvím vnitřního kyslíkového cyklu tak, že záporná elektroda nikdy nedosáhne stavu plného nabití [2].

Existují dva alternativní návrhy, jak vytvořit transport plynu ve VRLA člancích. První možností je použití elektrolytu ve formě gelu, druhá možnost je použít elektrolyt nasáklý v separátoru ze skelných mikrovláken. Plyny potom procházejí prasklinami v gelu nebo kanálky nezaplavenými elektrolytem.

Slitiny pro mřížky u ventilem řízených článků neobsahují antimon. Antimon se při korozi kladné elektrody uvolňuje do elektrolytu a vylučuje se na záporné elektrodě. Tento proces způsobí snížení přepětí vodíku a tím se zvýší plynování článku. Zvýšení plynování dále sníží efektivitu nabíjení záporné elektrody (antimonová otrava) [2].

V současné době se pozornost výrobců obrací na slitiny olova s vápníkem a cínem (pro aplikace s nepřerušovaným napájením) a slitiny olova s cínem (pro aplikace s hlubokým cyklováním).

Pokud kyslíkový cyklus probíhá příliš prudce, uvolňuje se značné množství tepla. To má za následek, že se nabíjení záporné elektrody stává obtížným a začíná vzrůstat rychlost sulfatace od spodní části desek, kde je koncentrace kyseliny sírové nejvyšší. Funkce kyslíkového cyklu je ovlivněna mikrostrukturou separátoru a způsobem nabíjení.

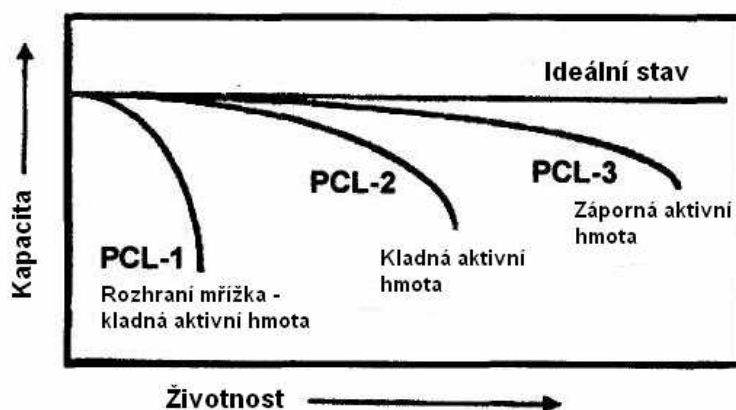
VRLA baterie trpí několika degradačními mechanismy, které jsou spojeny s nabíjením. Jen vzácně dochází k selhání v průběhu cyklování díky korozi mřížky. Začátkem 90. let většina VRLA baterií ukončila svou životnost během několika desítek cyklů nebo maximálně

během 100 - 200 cyklů, jak je schematicky zobrazeno na **Obr. 2.2** následkem tzv. PCL 1 efektu. Ten je způsoben vytvořením pasivační vrstvy na rozhraní mřížky a kladné aktivní hmoty. Moderní slitiny Pb-Ca-Sn tento problém překonaly ve většině případů.

Druhým degradačním mechanismem je PCL 2 efekt. Ten je způsoben kladnou aktivní hmotou. Zde dochází k izolaci původně vzájemně spojených částic  $PbO_2$ , které následně nevratně sulfatují a tím ztrácejí schopnost opětovného nabití. Tento degradační mechanismus se dá minimalizovat použitím vyšší komprese desek a separátoru s nižší pružností.

PCL 3 efekt je svázán s nedostatečným nabíjením záporné elektrody, byl objeven teprve nedávno a je hlavní příčinou selhání VRLA baterií, zejména baterií v hybridních elektrických vozidlech (HEV) a u systémů vzdálené dodávky energie (RAPS), kde baterie stráví většinu času ve stavu částečného nabití (PSoC). Tento degradační efekt nastává, když je kyslíkový cyklus během nabíjení tak významný, že celý přebíjecí proud je z velké části převeden na teplo. Tento jev je doprovázen zvýšenou sulfatací spodních oblastí záporných elektrod. Sulfatace způsobí napěťový gradient, který dále znesnadňuje nabíjení [2].

Právě pro výzkum výše uvedených degradačních jevů bylo vyvinuto měřicí pracoviště, které je popsáno v praktické části této práce.



**Obr. 2.2** Typy předčasné ztráty kapacity VRLA baterií

### 3 Měřicí pracoviště

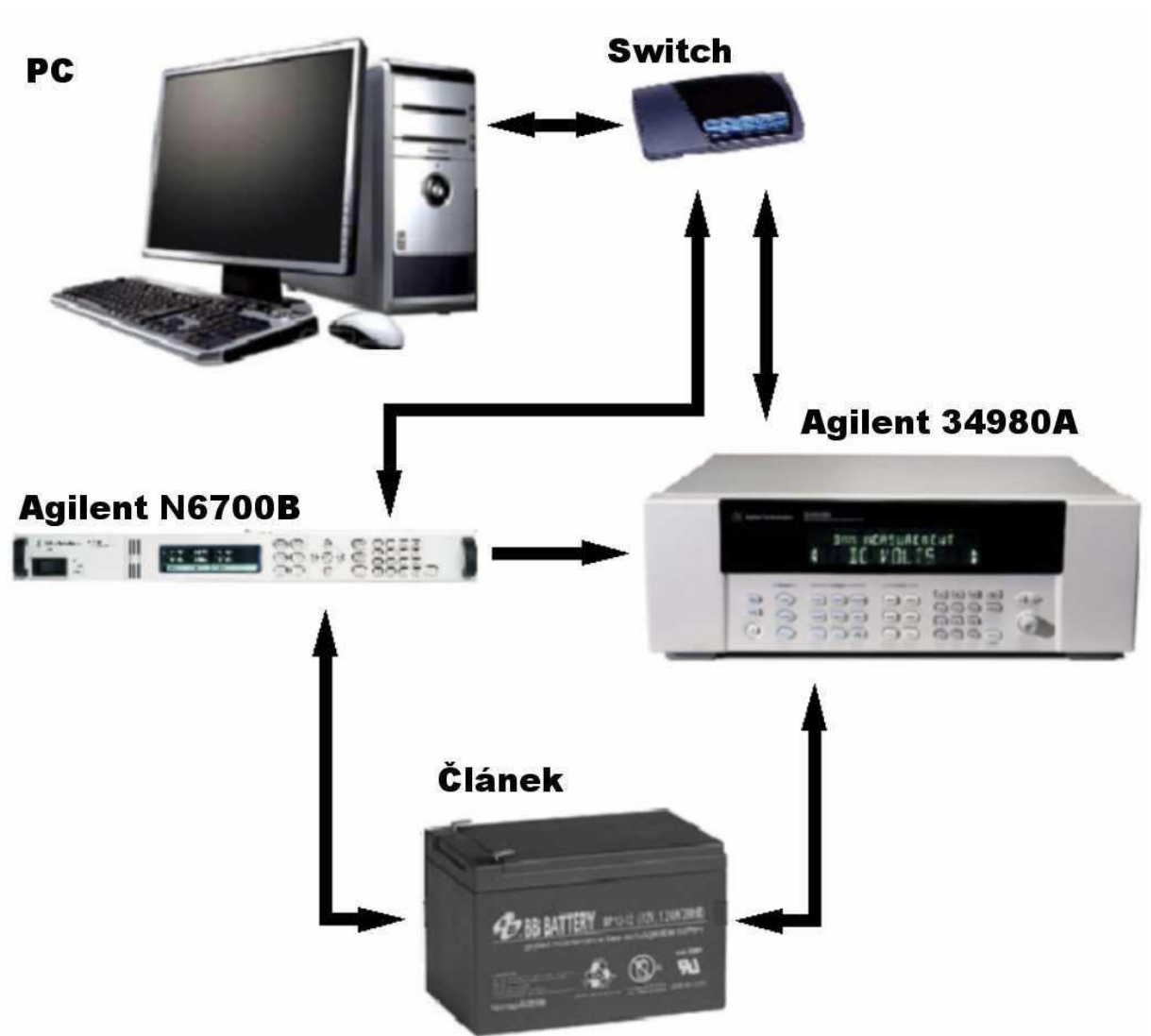
K provádění experimentů na člancích olověného akumulátoru, týkajících se degradačních efektů uvedených v kapitole 2, bylo vyvinuto moderní měřicí pracoviště.

Celé měřicí pracoviště je sestaveno ze dvou nezávislých měřicích jednotek (**Obr. 3.5**). Na obou jednotlivých jednotkách mohou běžet dva nezávislé experimenty, nebo může běžet jeden experiment na obou měřicích jednotkách současně (provoz na dvanácti člancích zároveň). Obě měřicí jednotky jsou identické po hardwarové i softwarové stránce.

Ovládání celého pracoviště zajišťuje PC připojený k pracovišti prostřednictvím sítě LAN. K této síti jsou rovněž připojeny zdroje Agilent N6700B a multifunkční digitální ústředna Agilent 34980A (**Obr. 3.1**).

#### 3.1 Složení jedné měřicí jednotky

- PC se síťovou kartou a systémem Microsoft Windows XP, MS Office a vývojovým prostředím VEE 8.0
- Multifunkční digitální ústředna Agilent 34980A s rozhraním 10/100 Ethernet + multiplexerová karta Agilent 34921A a přepínací reléová vstupní/výstupní karta Agilent 34938A
- Nízkoprofilová digitální soustava zdrojů Agilent N6700B s rozhraním 10/100 Ethernet
- NE Edimax Switch 8x10/100 Palmtop
- Experimentální článek



**Obr. 3.1** Zjednodušené celkové zapojení měřicího pracoviště

Digitální ústředna (**Obr. 3.2**) Agilent 34980A je měřicí jednotka, pomocí které lze sestavit měřicí systém pro měření proudů a napětí na člancích olověného akumulátoru. Měřicí ústředna Agilent 34980A je vybavena rozhraním Ethernet, USB 2.0 a GPIB. Základní jednotka obsahuje 8 pozic pro zásuvné moduly. V těchto pozicích je multiplexerová a přepínací karta. Multiplexerová karta slouží k vlastnímu měření napětí na člancích olověného akumulátoru. Přepínací (reléová) karta slouží k přepínání nabíjení / vybíjení / stání jednotlivých článků. Sada zdrojů Agilent N6700B slouží k nabíjení a vybíjení pokusných článků [4].

Sada zdrojů Agilent N6700B je vybavena rozhraním GPIB, 10/100 Base-T Ethernet a USB 2.0 všech standardů (**Obr. 3.4, Obr. 3.5**).



**Obr. 3.2** Multifunkční digitální ústředna Agilent 34980A



**Obr. 3.3** Přední panel 4-kanálové soustavy zdrojů Agilent N6700B (obrázek na displeji ukazuje 3 nainstalované zdroje)



**Obr. 3.4** Zadní strana 4-kanálové soustavy zdrojů Agilent N6700B

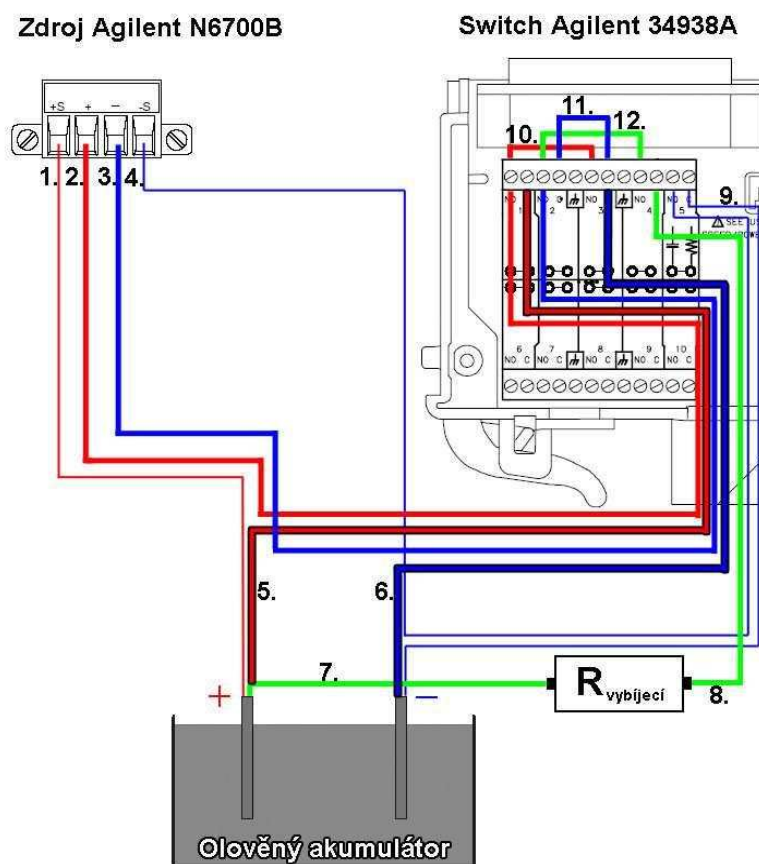


**Obr. 3.5** Kompletní sestavení měřicího pracoviště (nahore 3 sady zdrojů Agilent N6700B, uprostřed 2 multifunkční digitální ústředny Agilent 34980A, dole 2x PC)

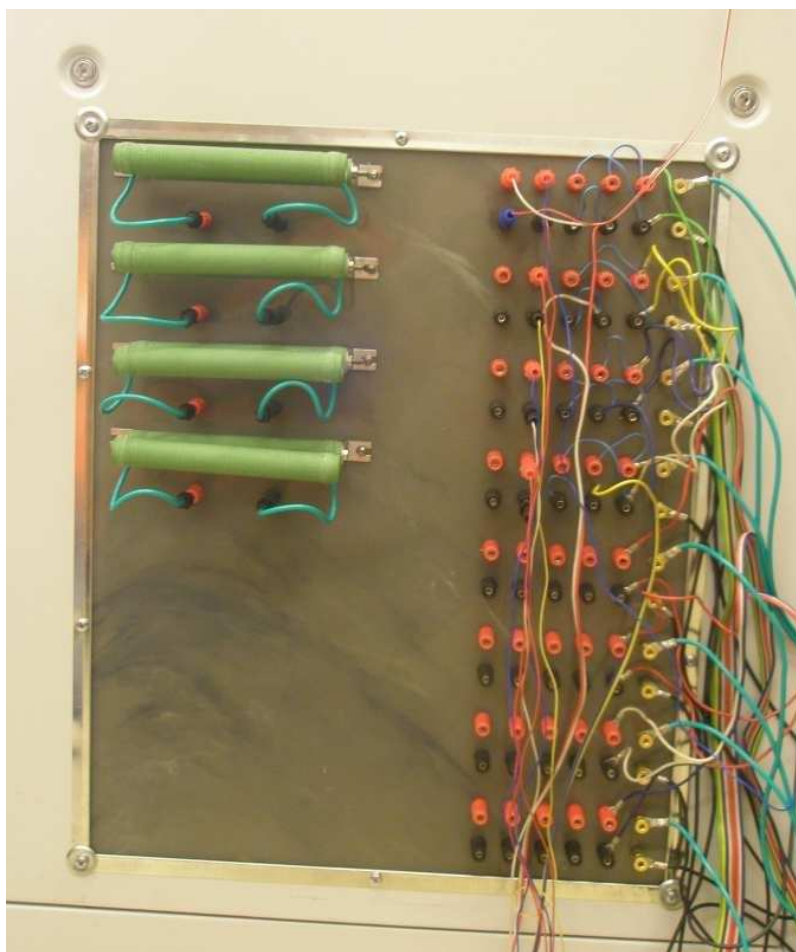
### 3.1.1 Zapojení a princip funkce

Při nabíjení akumulátoru je sepnuté relé č. 1, čímž se propojí kladná elektroda na článku s kladným pólem zdroje. Sepne se také relé č. 2, to zajišťuje propojení záporné elektrody se záporným pólem zdroje. Při nabíjení dojde k sepnutí relé č. 5 pro zjištění napětí na článku zdrojem. Vodiči 2 a 3 protéká proud, tím na nich vzniká úbytek napětí, které ovlivňuje správné nastavení proudu zdrojem.

Z tohoto důvodu se pro zjištění přesné hodnoty napětí na článku používají vodiče 1 a 4 (svorky +s a -s), které se připojí k článku přes relé č. 5. Ve vybíjecí části je propojena kladná elektroda s vybíjecím odporem a záporným pólem zdroje. Ve fázi stání nebo přepínání se všechna relé vypnou kvůli zamezení vzniku zkratového proudu. Článek je ještě zapojen do svorek multiplexové reléové karty Agilent 34921A. Na nich probíhá měření napětí na článku. Pomocí této karty se měří i další hodnoty (potenciály, vnitřní odpor, tlak plynů v uzavřené komoře článku a tlak působící na aktivní hmotu)[4]. Zapojení je vidět na **Obr. 3.6**.



Obr. 3.6 Zapojení a očíslování vodičů ve schématu [4]



**Obr. 3.7** Zapojení vybíjecích rezistorů na měřicím pracovišti

## 4 Měřicí program pro cyklování článku v režimu PSoC

Pro automatizované cyklování experimentálních článků byl vyvinut měřicí program v programovacím prostředí Agilent VEE Pro 8.0. Software Agilent VEE Pro je graficky orientované vývojové prostředí pro tvorbu programových aplikací pro automatizaci měřicích procesů, zpracování dat a řízení. Tvorba programu zjednodušeně odpovídá vytváření vývojového diagramu automatizovaného měřicího procesu. Maximální důraz je kladen na jednoduchost propojení s měřicími přístroji prostřednictvím sběrnic GPIB, LAN, USB, RS-232 či VXI, k dispozici jsou ovladače pro více než 1000 měřicích přístrojů od 70 různých výrobců [5].

### 4.1 Základní schéma programu PSoC

Ovládací panel zjednodušuje ovládání jinak velmi rozsáhlého programu, jak ukazuje **Obr. 4.1**. Naměřené hodnoty program zapisuje do souboru, který je použit pro další zpracování dat (grafické znázornění výsledků).

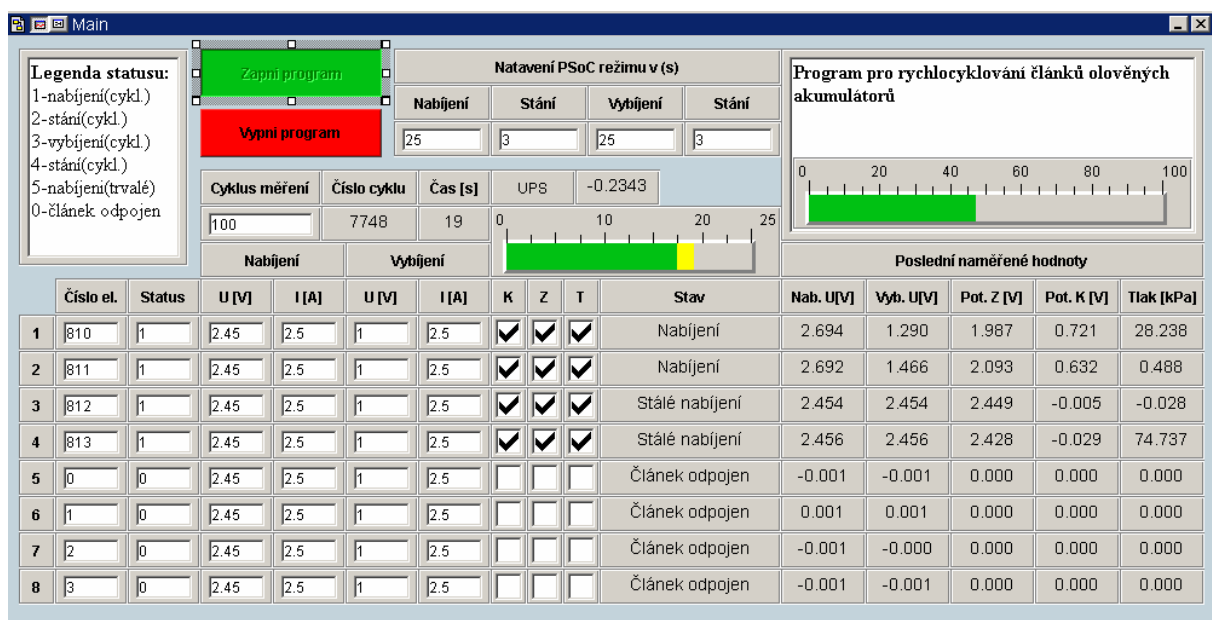
Program pro režim PSoC (rychlocyklování) v jednom cyklu provádí 4 operace: nabíjení, stání, vybíjení a stání. Celý cyklus simuluje v hybridním elektrickém vozidle akceleraci (vybíjení), trakční brzdění (nabíjení) a provoz na alternativní pohon např. spalovací motor (stání).

Experiment lze provádět až na osmi člancích zároveň viz **Obr. 4.1**. U každého článku se v ovládacím menu programu nastaví časové intervaly nabíjení, vybíjení a stání, po kolika PSoC cyklech bude provedeno měření a zápis do souboru, číslo elektrody, status (viz legenda statusu), nabíjecí a vybíjecí proudy procházející články, konečné vybíjecí napětí signalizující ukončení režimu PSoC na daném článku a přechod do režimu konstantního nabíjení s napěťovým omezením. Ve sloupcích označených písmeny **K**, **Z**, **T** se zapíná měření potenciálů kladné elektrody, záporné elektrody a měření tlaku uvnitř článku (články jsou hermetizovány).

Sloupce označené jako *poslední naměřené hodnoty* zobrazují hodnoty nabíjecího napětí, vybíjecího napětí, potenciálů kladné a záporné elektrody a tlaku naměřené vždy po posledním dokončeném cyklu.

Program zároveň přijímá signál z UPS. Při výpadku elektrické energie v síti program výpadek zaznamená a dále kontroluje stav baterie UPS, pokud baterii dochází energie, program odpojí všechna relé, uloží nastavení a ukončí se. Po opětovném zapnutí programu, je možné pokračovat v experimentu v místě, kde se program ukončil.

Pro ovládání programu stačí jen vyplnit číslo elektrody, z legendy si vybrat typ statusu a zvolit vhodné hodnoty nabíjecích a vybíjecích proudů a napětí. Po zmáčknutí tlačítka *zapni program* se spustí automatizované měření. Průběh měření je možno sledovat pomocí zelených ukazatelů. Zelený ukazatel ve středu ovládacího panelu zobrazuje, v jaké části cyklu se zrovna program nachází, ukazatel v pravé části programu zobrazuje číslo probíhajícího cyklu.



**Obr. 4.1** Ovládací panel programu pro měření článků olověného akumulátoru v režimu PSoC

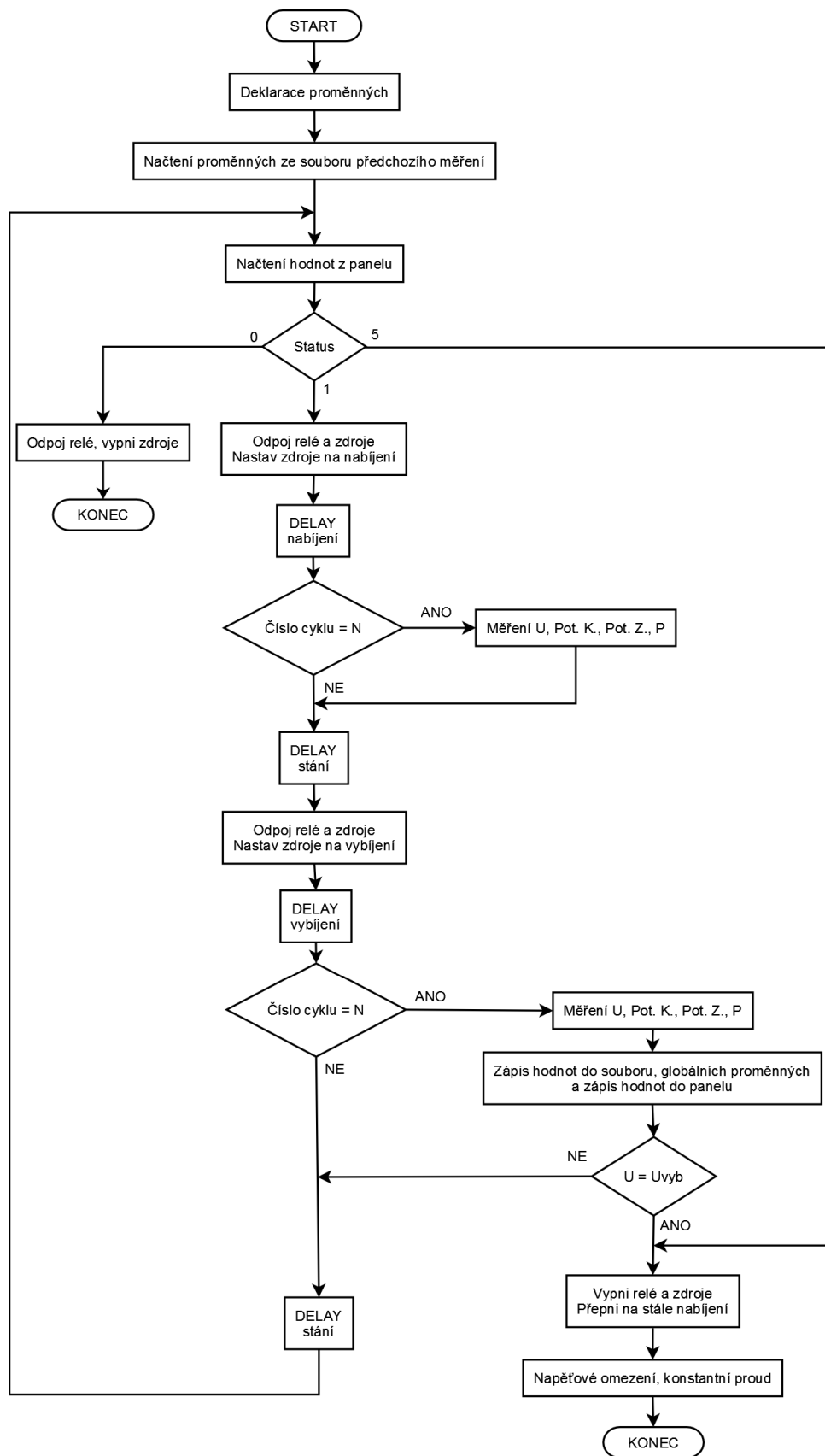
## 4.2 Blokové schéma programu

Na **Obr. 4.2** je zobrazen zjednodušený vývojový diagram celého programu rychlocyklování.

Po zapnutí programu dochází k deklaraci globálních proměnných a načtení proměnných ze souboru posledního měření. V dalším kroku program načte zadané hodnoty z panelu (Status, U, I, apod.).

Po načtení všech proměnných program prochází první podmínkou. Podmínkou je použitý status pro každý článek. Pokud je na daném článku *status 0 – článek odpojen* (legenda statusu **Obr. 4.1**), program na tomto článku odpojí relé, vypne zdroj a tím článek odpojí. Pokud je na článku definovaný *status 5 – trvalé nabíjení*, program se přepne do režimu trvalého nabíjení konstantním proudem a napětovým omezením.

Jestliže je na článku nastaven *status 1 – nabíjení (cykl.)* (status 2, 3, 4 pracují ve stejném cyklu jako status 1), program spustí cyklování v režimu PSoC. V prvním kroku odpojí relé, zdroje a nastaví zdroje na nabíjení. Dále je v blokovém diagramu blok *Delay nabíjení*, tady program nabíjí experimentální článek po dobu nastavenou v menu programu (viz **Obr. 4.1**), v tomto případě je to 25s. Program tímto simuluje trakční brzdění hybridního elektrického vozidla. V dalším bloku program kontroluje číslo cyklu, to je nastaveno v menu programu *Cyklus měření* (**Obr. 4.1**). Toto číslo udává počet cyklů, po kterých program bude měřit na experimentálním článku. Pokud podmínka vyhovuje, program změří napětí na článku, potenciály obou elektrod a tlak v článku. Potom program pokračuje dále. Pokud podmínka nevyhovuje, program neměří a pokračuje dále. V dalším kroku program přejde do režimu stání po nabíjení. Jde o simulaci provozu bez připojeného elektrického pohonu. Doba stání je opět nastavena v menu programu (**Obr. 4.1**). V následujícím kroku program odpojí relé, zdroje a přepne zdroje na vybíjení. Program vybíjí experimentální článek po dobu uvedenou v menu programu, stejně jako u nabíjení. V této části se simuluje akcelerace hybridního elektrického vozidla. Po dokončení vybíjení program opět kontroluje číslo cyklu, pokud odpovídá hodnotě zadané v menu programu, stejně jako u nabíjení, program změří hodnoty napětí, obou potenciálů elektrod a tlak v článku. Naměřené hodnoty program zapíše do souboru a do menu programu. Pokud nedojde k měření hodnot na článku, program přejde do režimu stání po vybíjení (stejný jako stání po nabíjení) a z něj se uzavírá cyklus na začátek programu, jak ukazuje **Obr. 4.2**.



**Obr. 4.2** Vývojový diagram programu rychlocyklování

Po zápisu hodnot do souboru a menu programu program kontroluje napětí na článku, pokud je napětí větší než napětí ve vybitém stavu uvedeném v menu programu (v tomto případě  $U = I V$ ), program pokračuje na stání po vybití a uzavře cyklus. Pokud je však napětí menší, program vypne příslušný zdroj, relé a přepne článek do režimu stálého nabíjení. Nabíjí se konstantním proudem a nabíjení je napěťově omezeno. Tato poslední část je zde jako ochrana proti hlubokému vybití článku. Program se ukončí pouze stiskem tlačítka *Vypni program* v menu programu nebo stiskem tlačítka *Stop* v prostředí VEE.

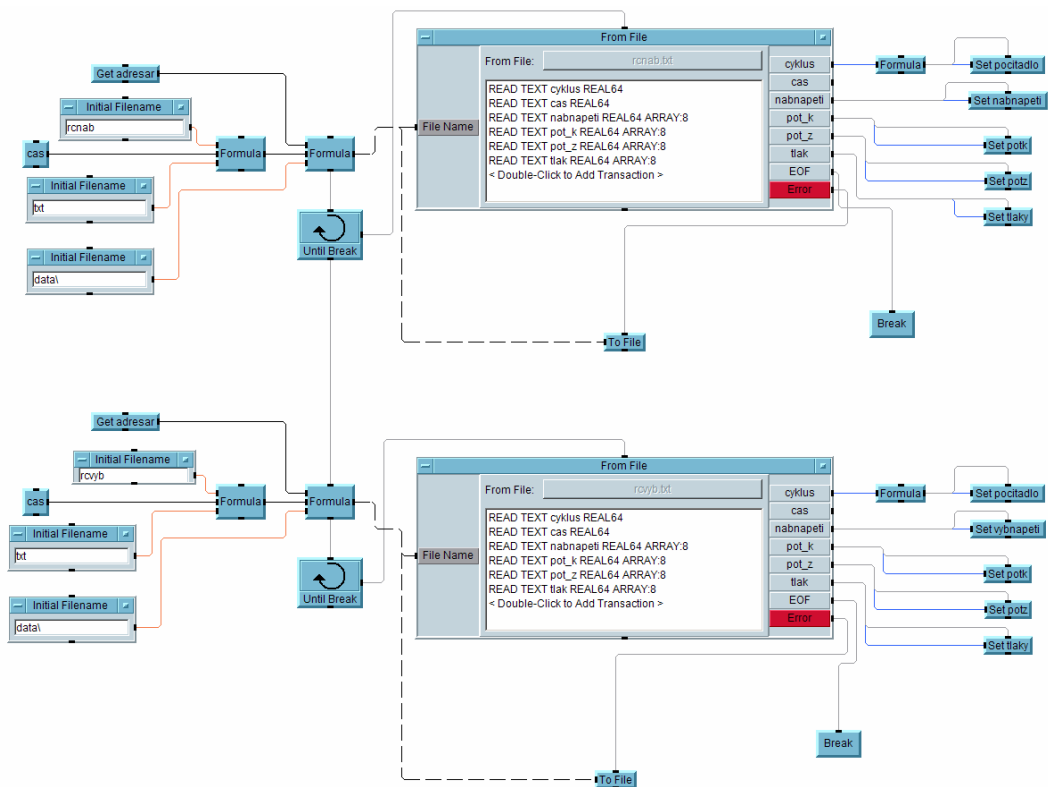
#### 4.2.1 Načtení hodnot předchozího měření

Program rychlocyklování ukládá naměřené hodnoty z nabíjení článku do souboru *rcnab.txt* a naměřené hodnoty při vybití článku do souboru *rcvyb.txt*. Načítání hodnot z posledního měření musí proto probíhat paralelně pro oba soubory (**Obr. 4.3**).

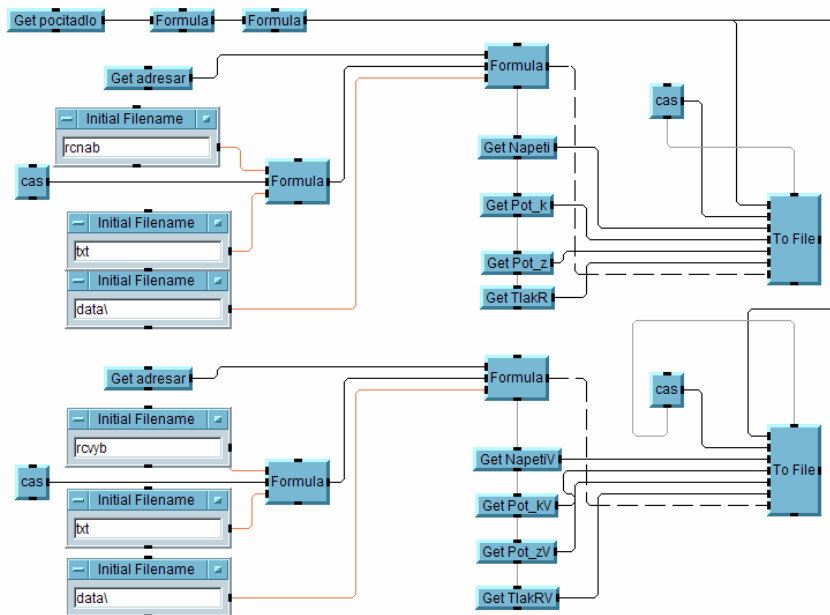
Soubory se ukládají a načítají ze složky ...*\data\*... . Jedná se o podsložku složky, ve které je uložen celý program rychlocyklování. **Obr. 4.3** ukazuje, jak je soubor postupně identifikován a načítán. Zvlášť je načítáno jméno souboru, jeho přípona a složka. K tomuto je načítán i čas běhu programu. Z těchto hodnot je vytvořen datový tok *soubor*, ze kterého jsou načítány hodnoty do pole pomocí funkce *From File* [5]. Načítány jsou postupně číslo cyklu, čas, napětí na článku, potenciál kladné a záporné elektrody a tlak uvnitř článku. Načtené hodnoty pak vytvoří pole globálních proměnných.

#### 4.2.2 Zápis do souboru

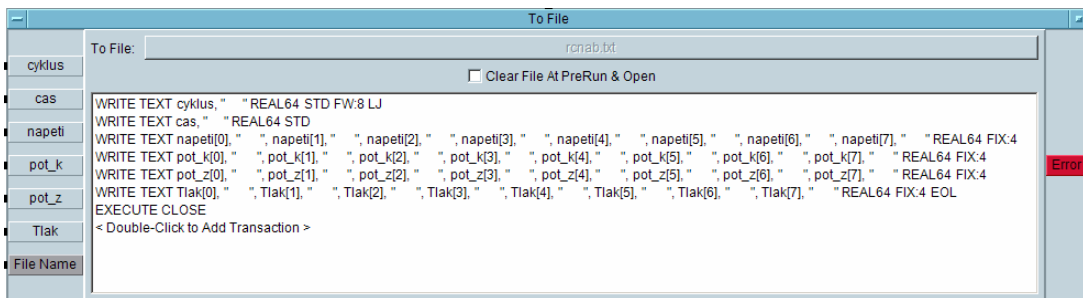
Modul pro ukládání naměřených dat do souboru musí nejdříve otevřít vlastní soubory (vytvořit, pokud neexistují) *rcnab.txt* a *rcvyb.txt*. Jak zobrazuje **Obr. 4.4** je soubor vytvořen pomocí funkce *Initial Filename*, skládá se opět ze tří částí (název souboru, přípona a složka). Princip je stejný jako při načítání hodnot ze souboru. Po vytvoření datového toku *soubor* jsou do něho vloženy hodnoty napětí, potenciálů a tlaků pomocí funkce *To File*. **Obr. 4.5** ukazuje výpis funkce *To File*, ze které lze vidět, že se zapisuje postupně číslo cyklu, napětí na článku, potenciál kladné elektrody, potenciál záporné elektrody a tlak uvnitř článku.



Obr. 4.3 Modul načtení hodnot z předchozího měření



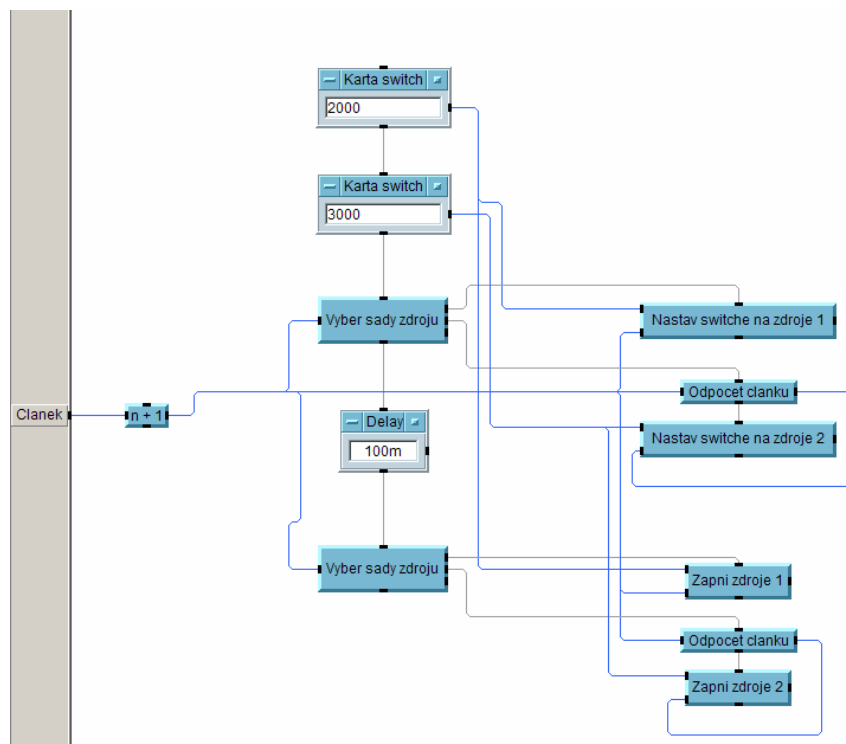
Obr. 4.4 Modul zápisu hodnot do souboru



Obr. 4.5 Výpis funkce To File

### 4.2.3 Nabíjení článku

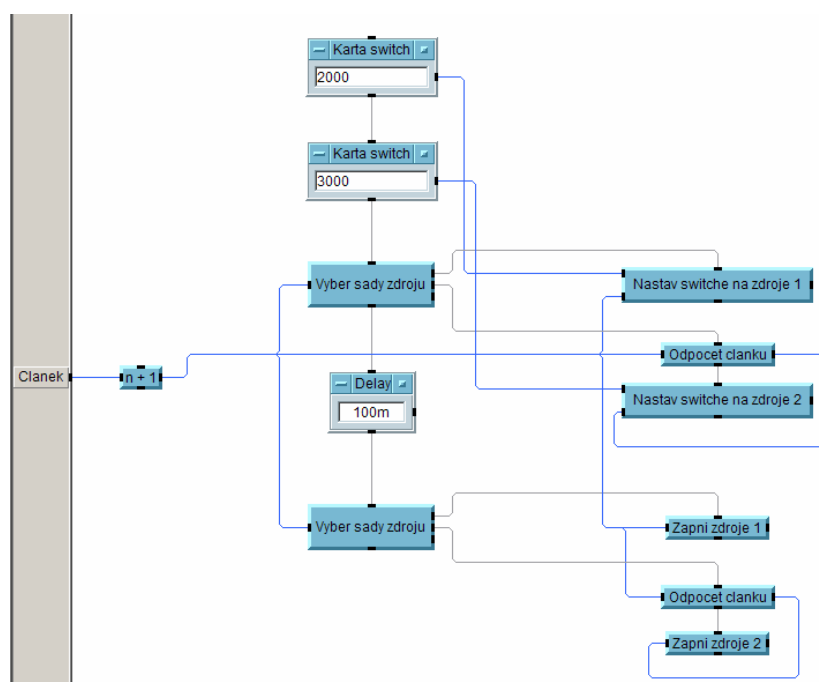
Při nabíjení je jediným vstupem číslo článku, to určuje, která sada zdrojů se připojí k článku a bude ho nabíjet (Obr. 4.6). Články 1, 2, 3, 4 jsou připojeny na sadu zdrojů 1 a články 5, 6, 7, 8 jsou připojeny k sadě zdrojů 2 (Obr. 4.8). Po výběru sady zdrojů dojde k připojení dané sady zdrojů k jednotlivým článkům. Po připojení zdrojů k článkům se zdroje zapnou a začnou článek nabíjet. Článek se nabíjí proudem zadaným v menu programu bez napěťového omezení. Podobně pracuje modul pro stále nabíjení článků, které byly příliš hluboce vybity. Rozdíl je ve způsobu nabíjení. Nabíjí se konstantním proudem s napěťovým omezením nastaveným v menu programu.



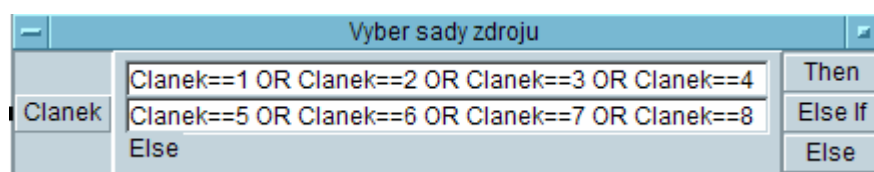
Obr. 4.6 Modul nabíjení článku

#### 4.2.4 Vybíjení článku

Modul vybíjení článku je velice podobný modulu nabíjení článku (**Obr. 4.6**). Stejně jako v modulu nabíjení článku dochází k výběru sady zdrojů (**Obr. 4.7**) pro daný článek, poté se připojí jednotlivé články k daným sadám zdrojů. Po zapnutí zdroje dochází k vybíjení článku. Článek se vybíjí konstantním proudem zadaným v menu programu a bez napětového omezení. Sada zdrojů se volí, protože k jedné sadě se dají připojit jen čtyři články. Blok *Odpočet článku* (**Obr. 4.7**) nabývá hodnoty  $n-4$  kde  $n$  je číslo článku, tento blok je zde proto, aby první článek připojený ke zdroji měl vždy číslo 1.



**Obr. 4.7** Modul vybíjení článku

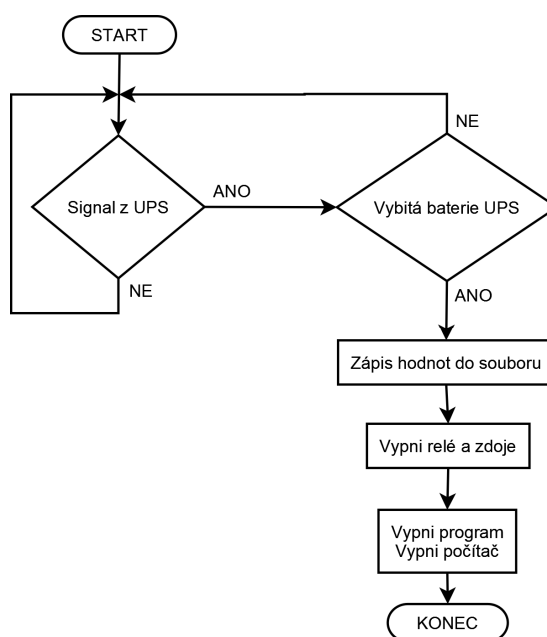


**Obr. 4.8** Výběr sady zdrojů

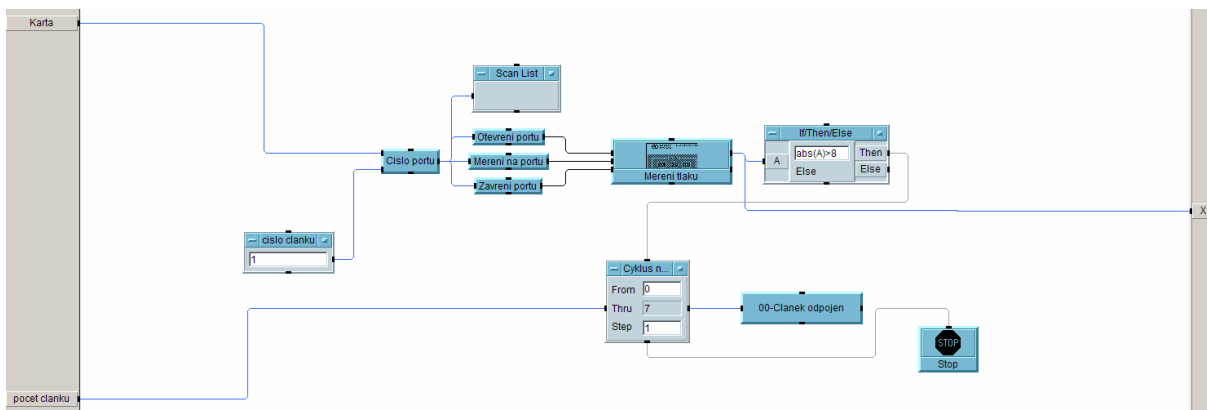
#### 4.2.5 Modul UPS

Celé měřicí pracoviště je připojeno k zařízení UPS (Uninterruptible Power Supply). Aby nedošlo ke znehodnocení naměřených dat v důsledku výpadku elektrické energie v síti, musí i samotný program sledovat stav UPS. Zařízení UPS (BENNING MT - Compact) vysílá po sériovém portu signál, který signalizuje kritický stav baterie (20 %). Pokud je baterie UPS nabitá, má signál hodnotu  $U_{UPS} = 0 V$ . Tato úroveň signálu představuje logickou nulu při komunikaci po RS232. Skutečná hodnota signálu je v menu programu  $U_{UPS} = - 0.23 V$ . To po program představuje stále logickou nulu. Pokud klesne kapacita baterie na kritickou hodnotu, signál přejde na logickou jedničku, kterou představuje napětí  $U_{UPS} = 15 V$ .

Jestliže má baterie kriticky málo energie, signál signalizující její stav má hodnotu napětí  $U_{UPS} > 8 V$  (**Obr. 4.10**) Program uloží dosud naměřené hodnoty do souboru, odpojí relé, vypne zdroje (modul článek odpojen), vypne celý program a následně se vypne celý počítač. Po opětovném zapnutí programu, program pokračuje v měření tam, kde skončil.



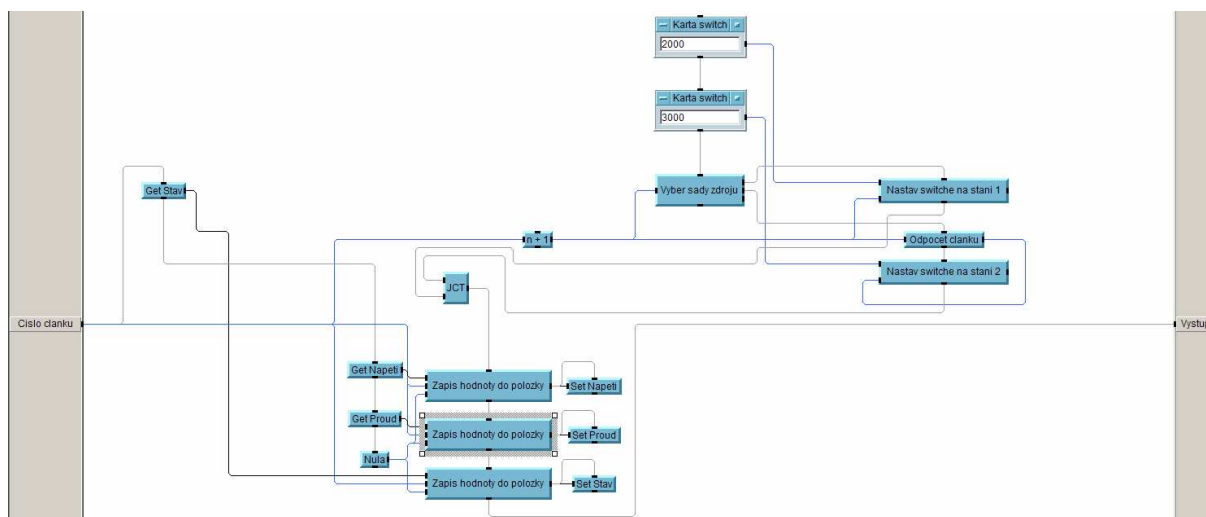
**Obr. 4.9** Vývojový diagram modulu sledování stavu UPS v programu



Obr. 4.10 Modul pro zjišťování stavu UPS

#### 4.2.6 Článek odpojen

Modul programu článek odpojen je obsažen jak v hlavní větvi programu (jeden ze statusů v menu programu – **Obr. 4.1**), tak i modulu UPS (**Obr. 4.10**). Stejně jako v modulu nabíjení a vybíjení článku dochází k výběru sady zdrojů a následnému nastavení přepínací reléové karty. Tato karta článek odpojí od zdrojů a signalizuje, že má program zapsat naměřené hodnoty do souboru. Modul zápis do položky vezme hodnoty napětí a proudů, zapíše je do souboru a následně je zapíše do pole globálních proměnných.



Obr. 4.11 Modul článek odpojen

## 5 Měřicí program pro standardní cyklování

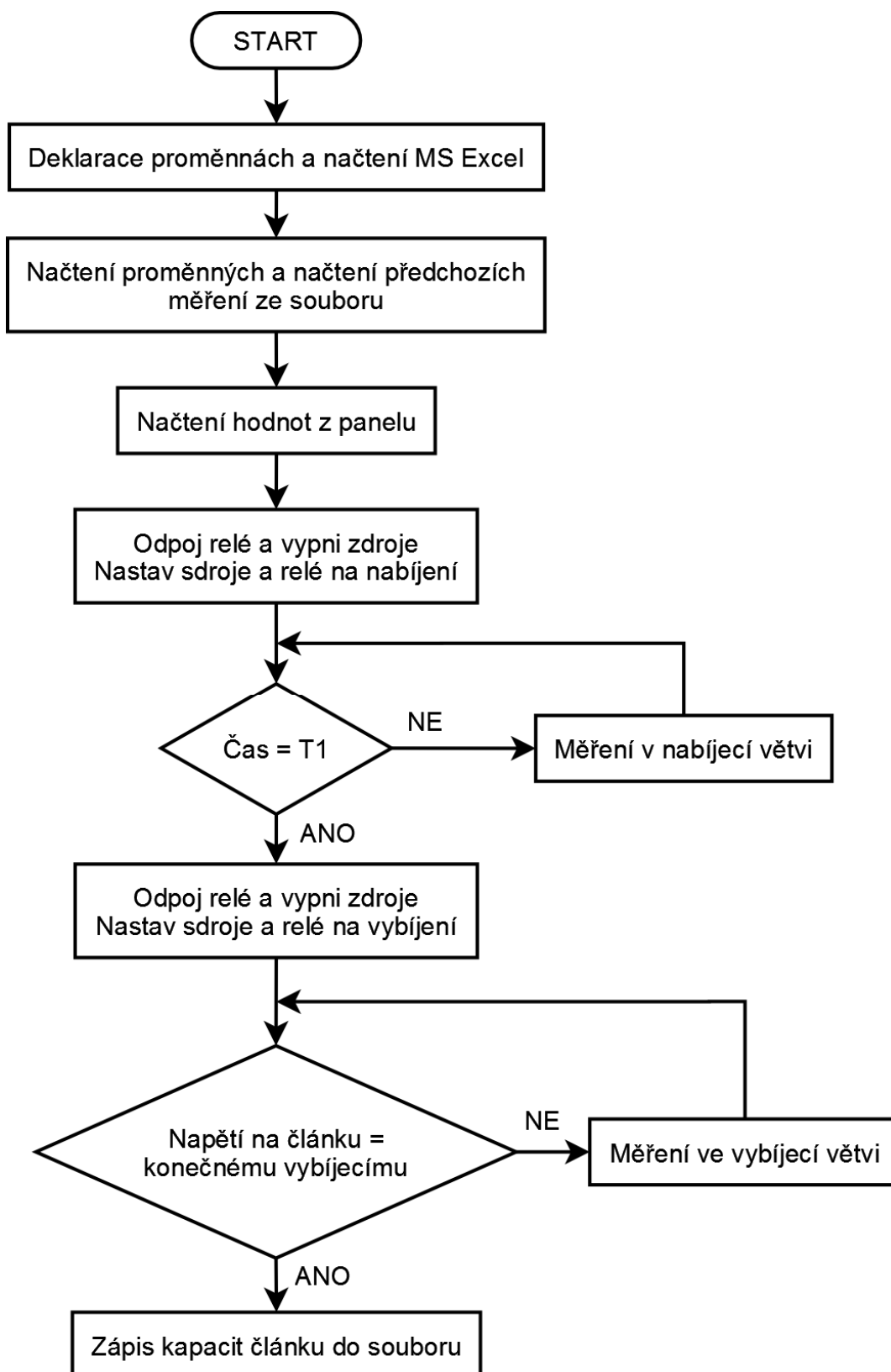
Program pro standardní cyklování (pomalocyklování) článků olověného akumulátoru slouží jako simulace trakčního akumulátoru, kdy je použitý článek cyklován mezi stavem nabití a úplným vybitím. Vybíjení zde simuluje provoz akumulátoru v elektrickém vozidle (EV), např. vysokozdvihný elektrický vozík.

### 5.1 Základní schéma programu

Program pro automatizované měřicí pracoviště pro výzkum experimentálních článků olověných akumulátorů byl od začátku vyvíjen pro měření více článků, stejně jako program pro cyklování článků v režimu PSoC. Proto bylo nutné pomocí proměnné typu pole v celém programu vytvořit zapínání a vypínání měřících okruhů [4]. Přepínač jednotlivých módů měření je uveden v ovládacím panelu (**Obr. 5.2**). Tímto se zjednodušilo nastavování a měření na pracovišti. Naměřené nebo vypočtené hodnoty z příslušných přístrojů se zaznamenávají a ukládají do textového souboru (je možno zvolit i záznam a ukládání do tabulkového procesoru MS Excel). Vzhledem k rozsahu a složitosti měřicího programu je zde místo kompletního výpisu programu uveden zjednodušený vývojový diagram celého programu na **Obr. 5.1**. Kompletní dokumentace programu je na přiloženém CD. Podrobně zde je popsán pouze modul Nabíjení článku.

Po zapnutí programu dojde k načtení nastavení z menu programu. Nabíjení a vybíjení článků je prováděno v nekonečné smyčce, nabíjení je ukončeno časovou podmínkou kdežto vybíjení hodnotou napětí na článku. Program může být ukončen kdykoliv obsluhou (tlačítko „Vypni program“).

Při nastavení nabíjení článku program pokračuje do modulu nabíjení (kap 5.1.2). Ukončení nabíjení se provede po splnění časové podmínky nastavené v ovládacím panelu.



**Obr. 5.1** Zjednodušený vývojový diagram měřicího programu

Při vybíjení začíná měření na člancích v intervalu, který se předem nastavil v ovládacím panelu. Ukončení vybíjení nastává při poklesu konečného napětí na určenou hodnotu.

Po ukončení vybíjecí části programu, se ještě ukládá datum, číslo cyklu vybíjení a vypočítané kapacity článků do textového souboru. Následuje přepnutí do režimu nabíjení.

Měřené veličiny a vypočítané hodnoty na člancích (napětí, proud, stupeň nabití, potenciál na kladné a záporné elektrodě a tlaky) jsou zapisovány ve stanovených měřených intervalech do textového souboru.

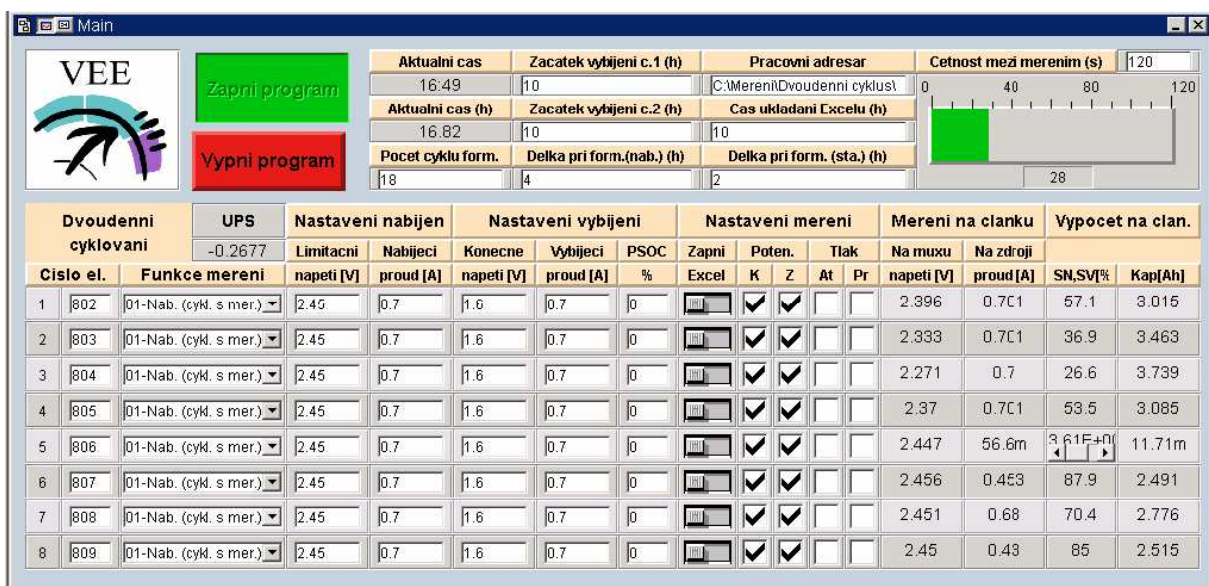
### **5.1.1 Ovládací panel programu**

Ovládací panel podstatně zjednodušuje ovládání, velmi rozsáhlého programu. Jak ukazuje **Obr. 5.2**, nastaví se zde funkce měření, hodnoty proudů a napětí, zápis do excelovského souboru, který generuje i grafy pro jednotlivé články.

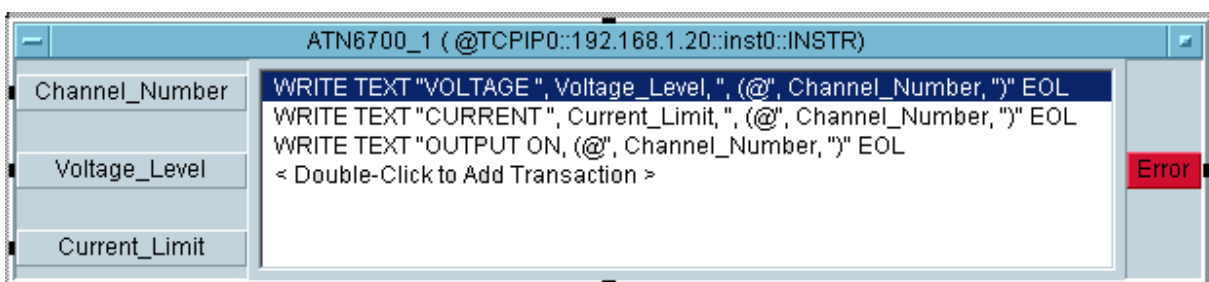
### **5.1.2 Modul nabíjení programu**

Modul nabíjení je zobrazen na zjednodušeném vývojovém diagramu na **Obr. 5.4**. a celé schéma modulu nabíjení je zobrazeno na **Obr. 5.5**.

Při zapnutí modulu nabíjení článku dojde nejprve k ověření 1. průchodu cyklem. Pak program nastaví nulové hodnoty do proměnných (stav nabití, dodaný náboj a proud předchozího měření). Poté se odpojí příslušný zdroj a příslušné vybíjecí relé. Po tomto kroku se připojí příslušné nabíjecí relé, poté se nastaví (**Obr. 5.3**) a zapne příslušný zdroj (**Obr. 5.6**).



Obr. 5.2 Menu programu pomalocyklování



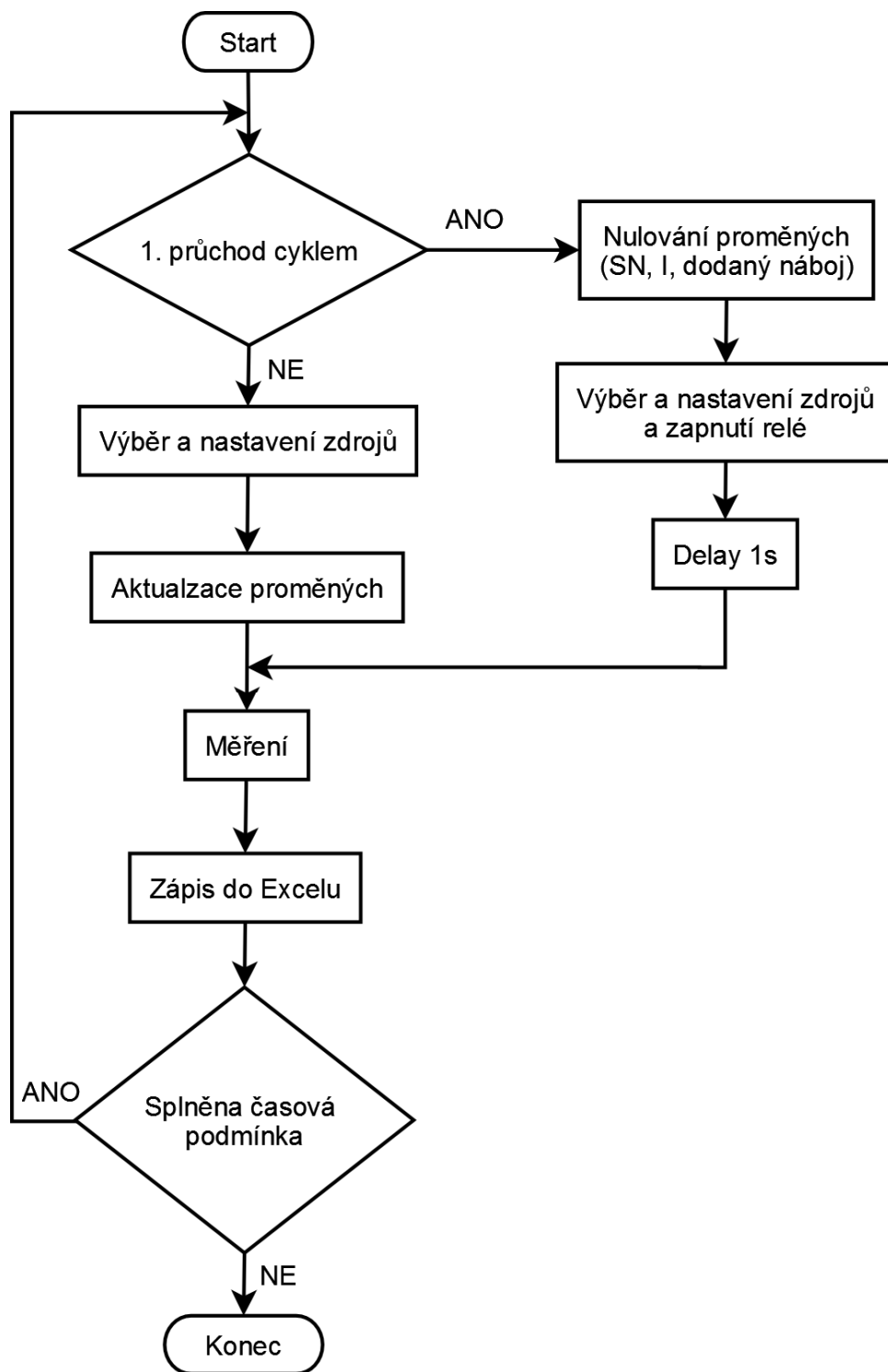
Obr. 5.3 Nastavení parametrů zdroje

Po zapnutí příslušného zdroje se nastaví čas startu měření a začíná vlastní nabíjení článku. Před prvním měřením proudu a napětí je ještě vloženo zpoždění  $t=1$  s, jelikož při zapnutí zdroje dojde ke vzniku napěťové (proudové) špičky, po tomto zpoždění špička již odezní a neovlivní naměřené hodnoty.

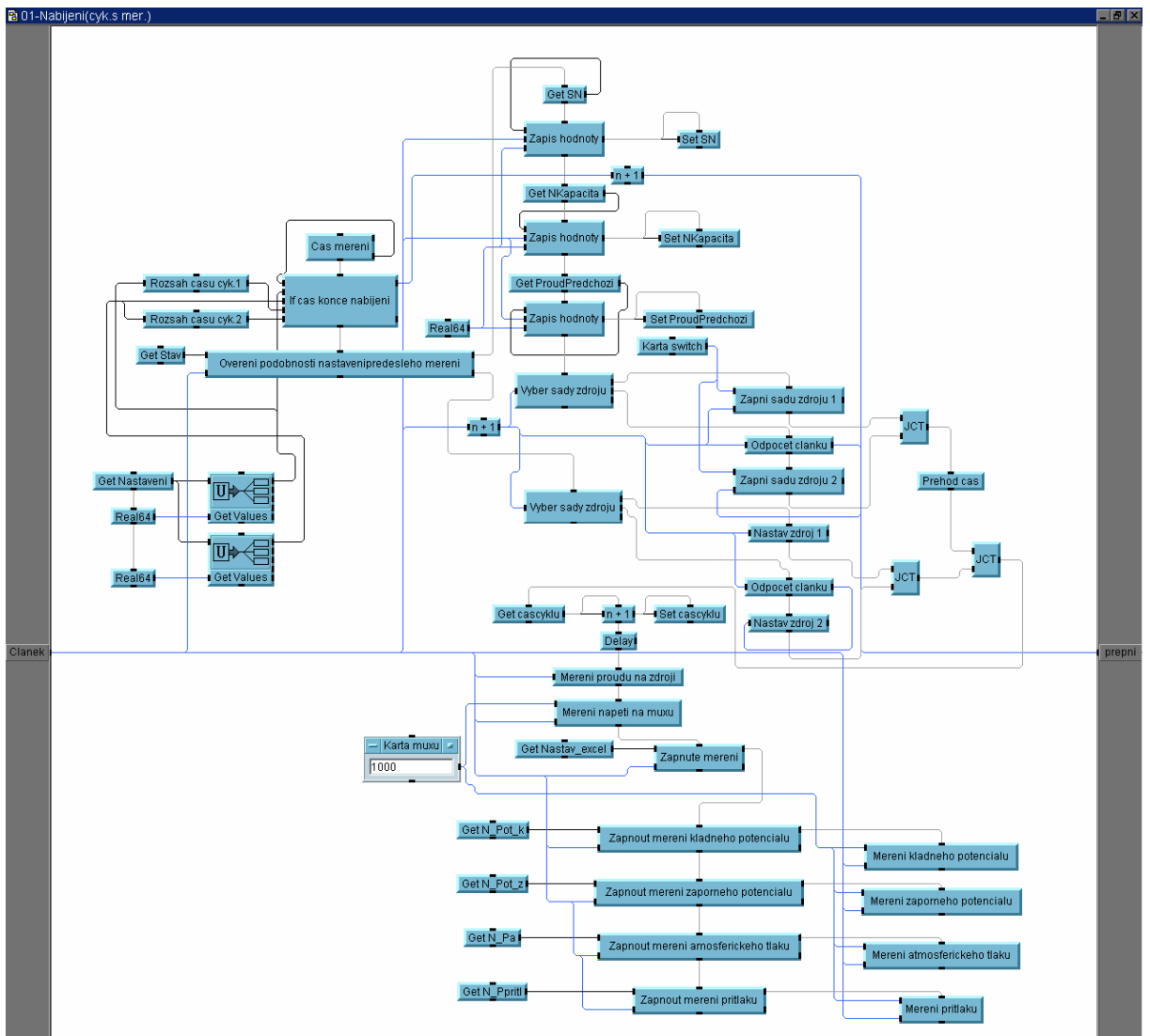
Po předchozích úkonech začíná program měřit hodnotu nabíjecího proudu na zdroji. Vždy se změří hodnota proudu a zapíše se do souboru. Dojde také k výpočtu a zápisu stupně nabití článku (SN) a aktuální hodnoty dodaného náboje.

Dále se měří hodnota napětí na článku (pomocí desky reléového multiplexeru na přístroji Agilent 34980A), potenciálu na kladných a záporných elektrodách, tlak plynů v uzavřené komoře článku a tlak působící na aktivní hmotu. Naměřené hodnoty se zapíší do souboru a

cyklus se vrací na začátek. Měření končí při splnění časové podmínky zadané v menu programu.



**Obr. 5.4** Blokové schéma modulu nabíjení



**Obr. 5.5** Schéma modulu nabíjení

Jak již bylo uvedeno, z naměřeného proudu se vypočítává momentální dodaný náboj článku v daném intervalu.

$$Q_{\text{momentální}} = (T_{\text{konec}} - T_{\text{start}}) \cdot I_{\text{zdroje}} \quad [ \text{Ah}; \text{h}, \text{A} ] \quad (5.1)$$

Kde:

$Q_{\text{momentální}}$  - momentální náboj při nabíjení jednoho článku v daném měřicím intervalu [Ah]

$T_{\text{konec}}$  - koncový čas měřicího intervalu při nabíjení [ h ]

$T_{\text{start}}$  - čas začátku měřicího intervalu při nabíjení [ h ]

$I_{zdroje}$  - momentální naměřený proud na zdroji [ A ]

Momentální náboj je důležitý pro výpočet celkového náboje dodaného článku při nabíjení. Výpočet je prováděn v každém měřicím intervalu a to přičtením momentálního náboje k celkovému náboji dosud dodanému článku. Ten dále slouží k výpočtu stupně nabití podle následujícího vzorce:

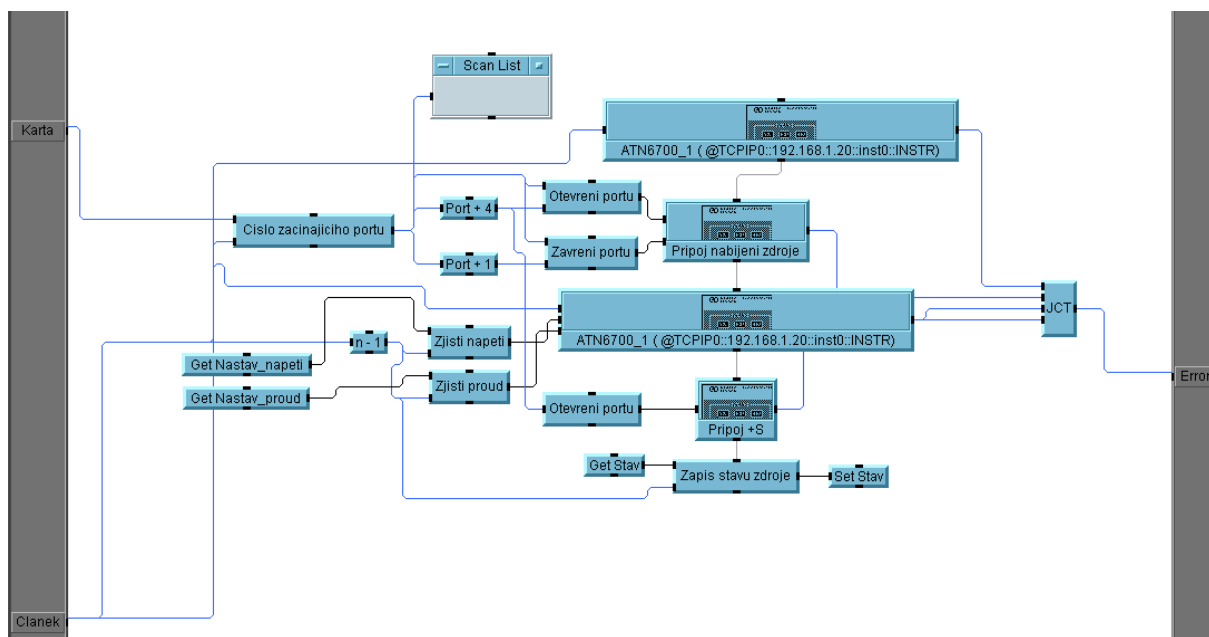
$$SN = (Q_{celkový} / Q_{předchozí}) \cdot 100 [\%] \quad (5.2)$$

Kde:

$SN$  - stupeň nabití [ % ]

$Q_{celkový}$  - celkový náboj článku dosud dodaný při nabíjení [ Ah ]

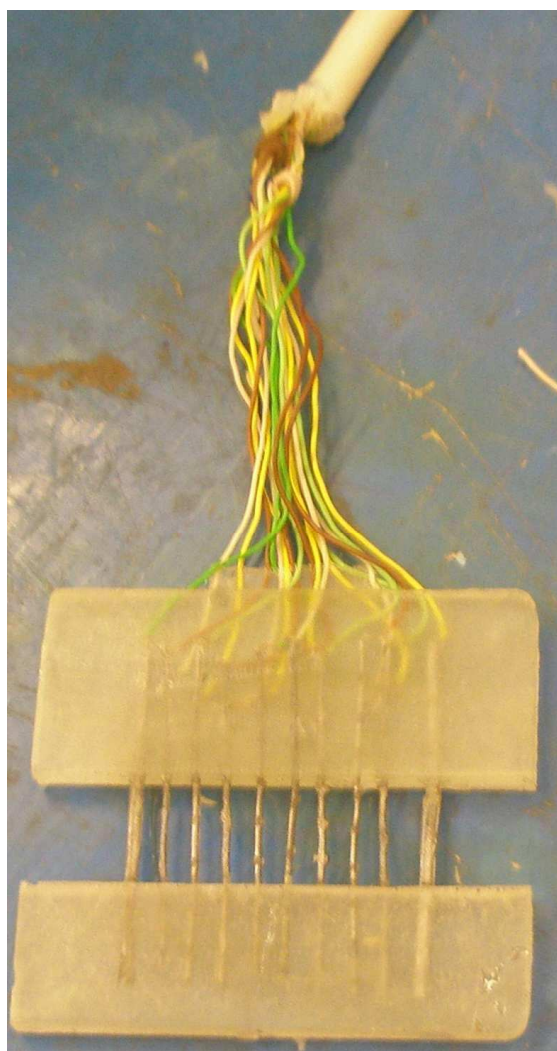
$Q_{předchozí}$  - celkový náboj článku zjištěný z předchozího vybíjení [ Ah ]



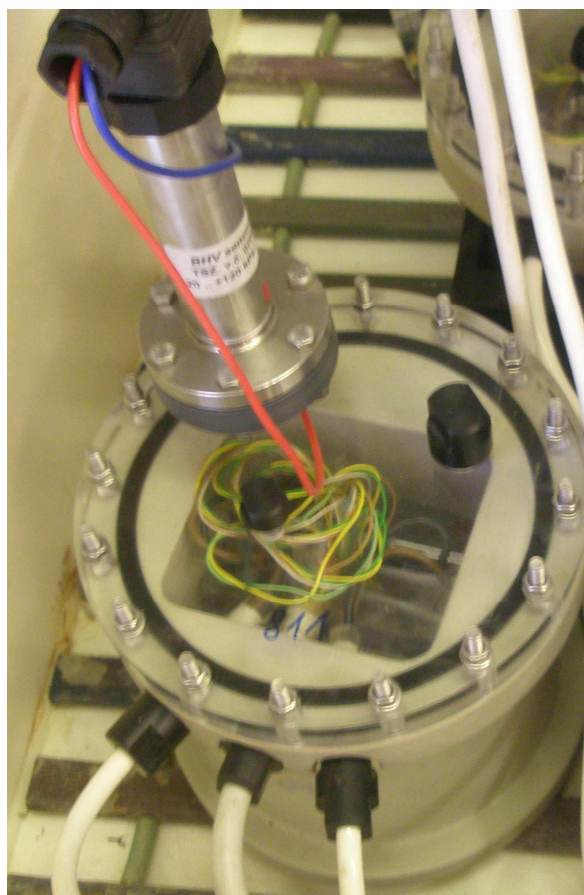
**Obr. 5.6** Zapnutí sady zdrojů

## 6 Experimentální část

Pro měření všech experimentů na člancích olověného akumulátoru se v laboratoři využívají články vlastní výroby uzavřené v hermetizovaných komůrkách. Elektrody (**Obr. 6.1**), ze kterých jsou sestaveny články, jsou vyrobeny z mřížek autobaterie a na obou koncích jsou zality epoxidovou pryskyřicí z důvodu zafixování žeber. Článek je složen vždy ze tří elektrod, měřicí záporná elektroda (**Obr. 6.1**) je obklopena dvěma kladnými elektrodami. Takto vyrobený článek je vložen do hermetizované komůrky (**Obr. 6.2**). V komůrce je ještě navíc vložena kadmiová referenční elektroda, která slouží k měření potenciálů kladné a záporné elektrody. Články jsou napastovány ve firmě AKUMA Mladá Boleslav.



**Obr. 6.1** Měřicí - záporná nenapastovaná elektroda experimentálního článku



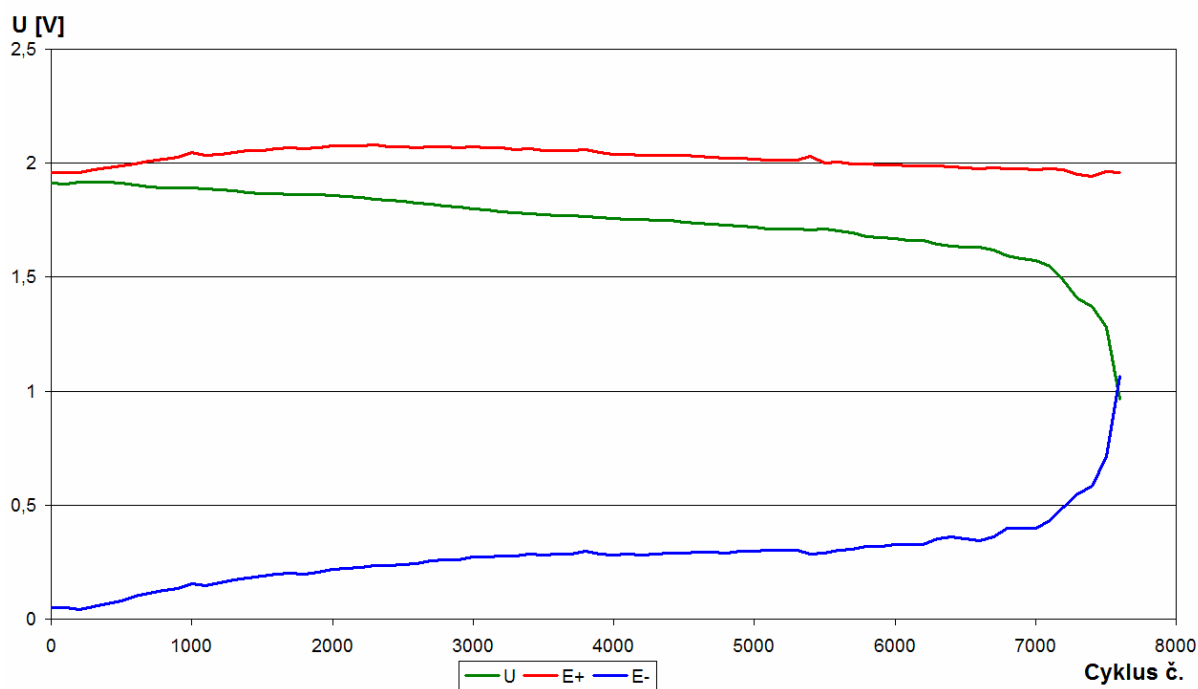
**Obr. 6.2** Hermetizovaný experimentální článek

### 6.1 Grafy naměřených charakteristik

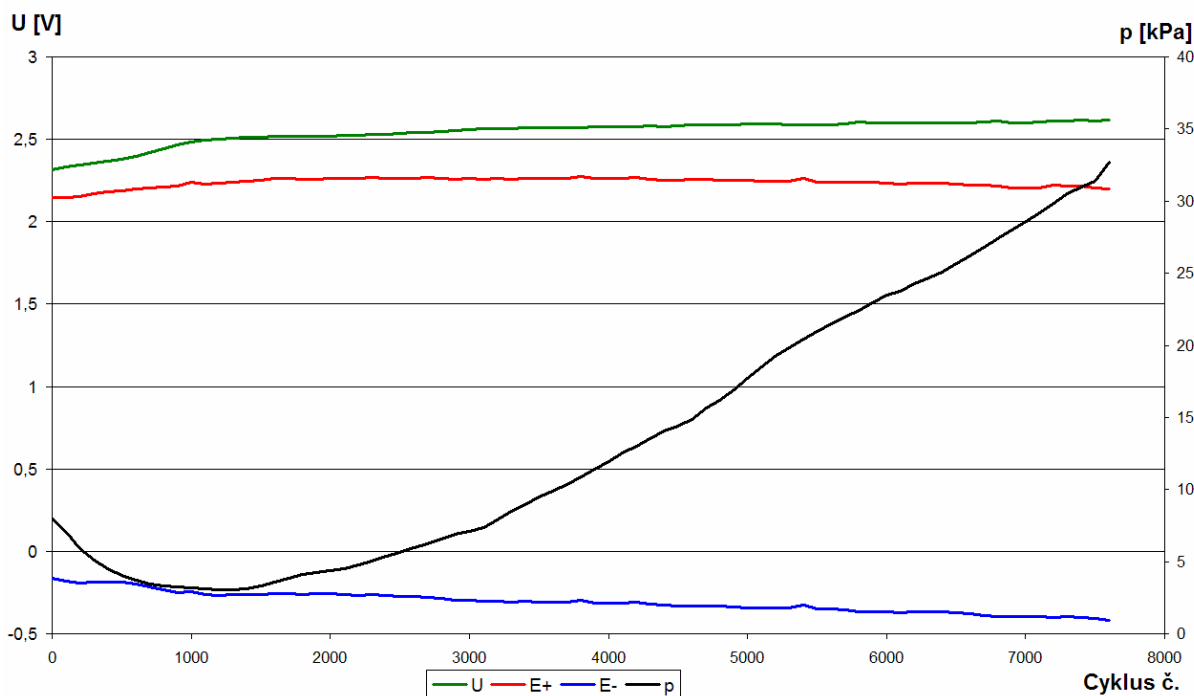
Díky sestaveným článkům bylo možné otestovat provoz obou programů. **Obr. 6.3** zobrazuje typické průběhy napětí a potenciálů obou elektrod na jednom článku na konci vybíjení v režimu PSoC. **Obr. 6.4** zobrazuje průběhy napětí, potenciálů obou elektrod a tlaku na konci nabíjení v režimu PSoC. Na obrázku je patrné jak s rostoucím napětím začíná článek plynovat, což je zobrazeno nárůstem tlaku uvnitř hermetizované komůrky. **Obr. 6.5** zobrazuje průběhy napětí na konci vybíjení na dvanácti člancích, každý průběh je jiný, jelikož každý článek má elektrody obohacené jiným materiálem, což je cíl výzkumu dalších studentů a doktorandů v laboratoři chemických zdrojů. Průběhy napětí na všech člancích na konci nabíjení jsou patrné na **Obr. 6.6**. Průběhy jsou opět rozdílné ze stejného důvodu jako průběhy při vybíjení.

**Obr. 6.7** zobrazuje typický průběh napětí, proudu, potenciálů obou elektrod a stavu nabití/vybití na jednom článku při standardním cyklování. Na **Obr. 6.8** jsou zobrazeny

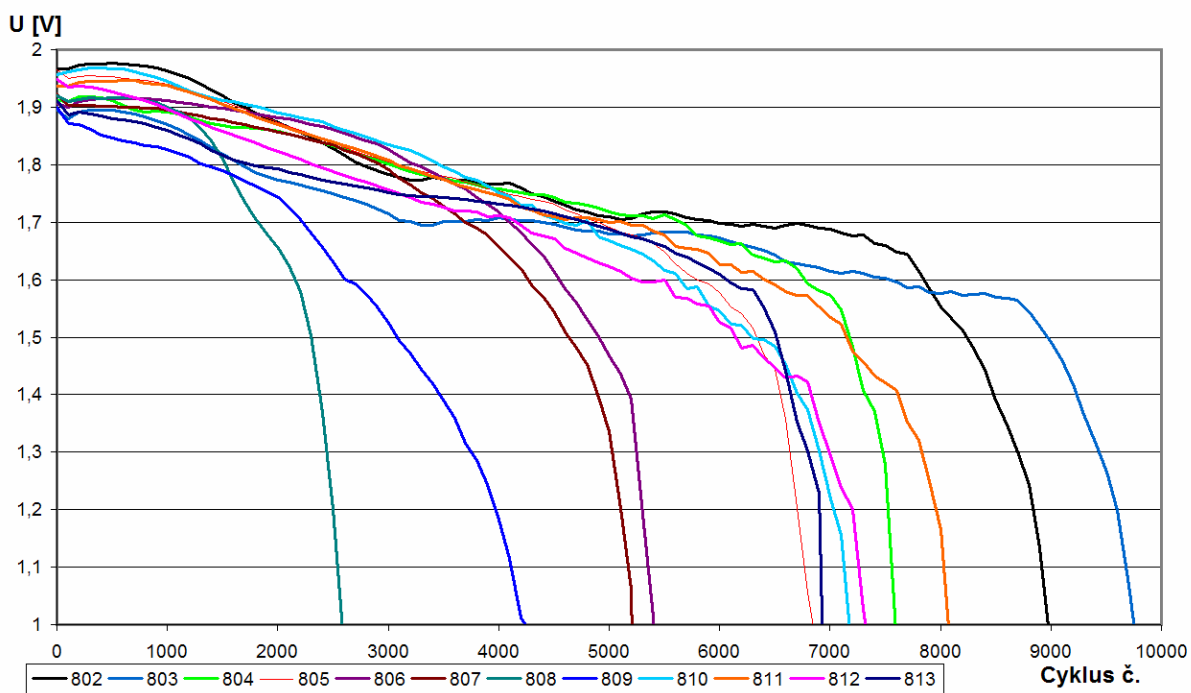
průběhy napětí na osmi člancích v programu standardního cyklování. Průběhy jsou odlišné ze stejného důvodu jako v režimu PSoC.



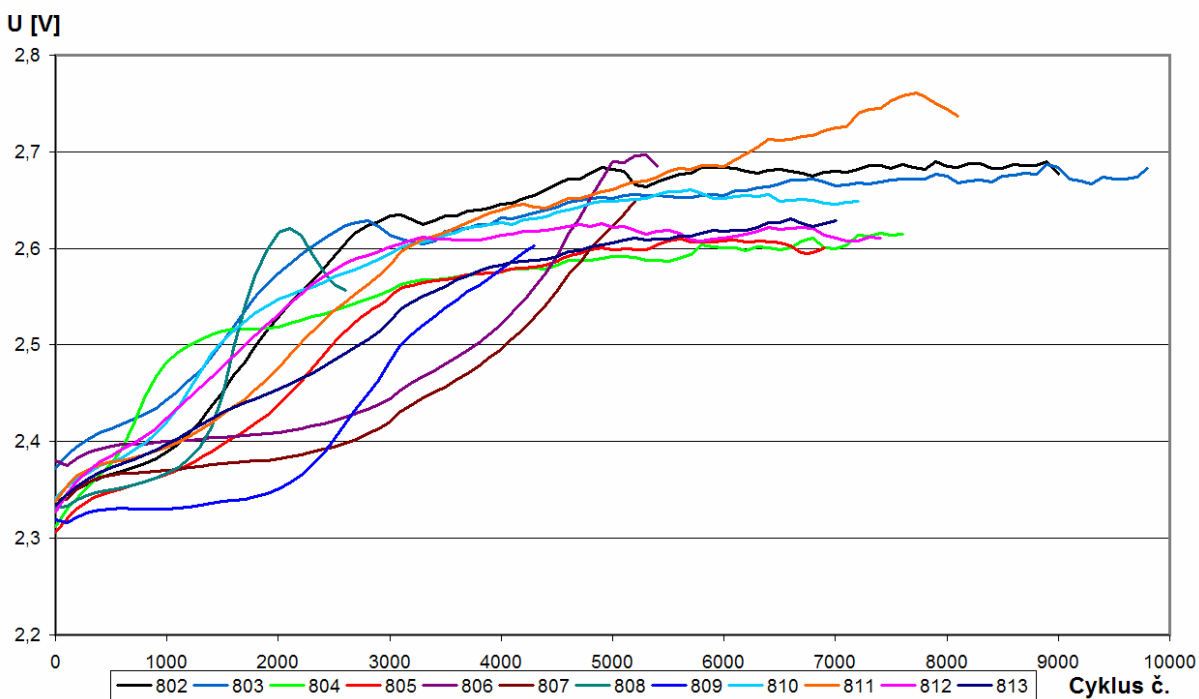
**Obr. 6.3** Průběhy napětí a potenciálů obou elektrod na jednom článku na konci vybíjení v režimu PSoC



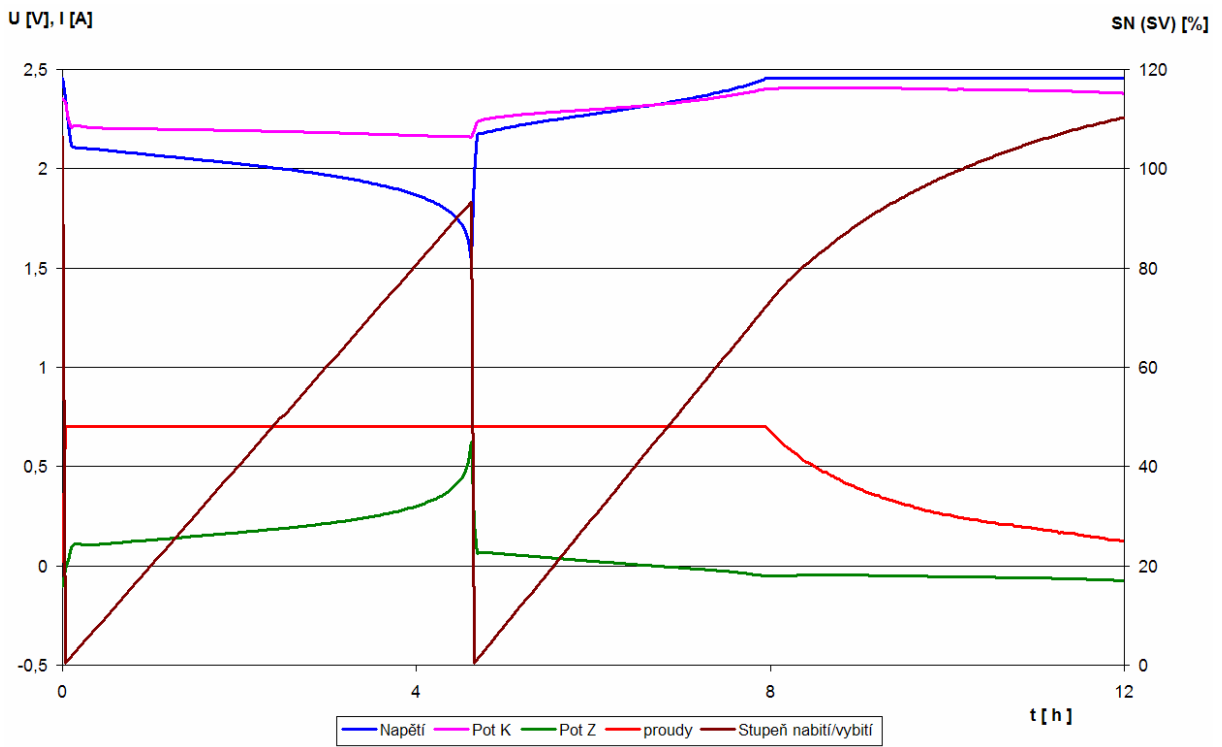
**Obr. 6.4** Průběhy napětí, potenciálů obou elektrod a tlaku na jednom článku na konci nabíjení v režimu PSoC



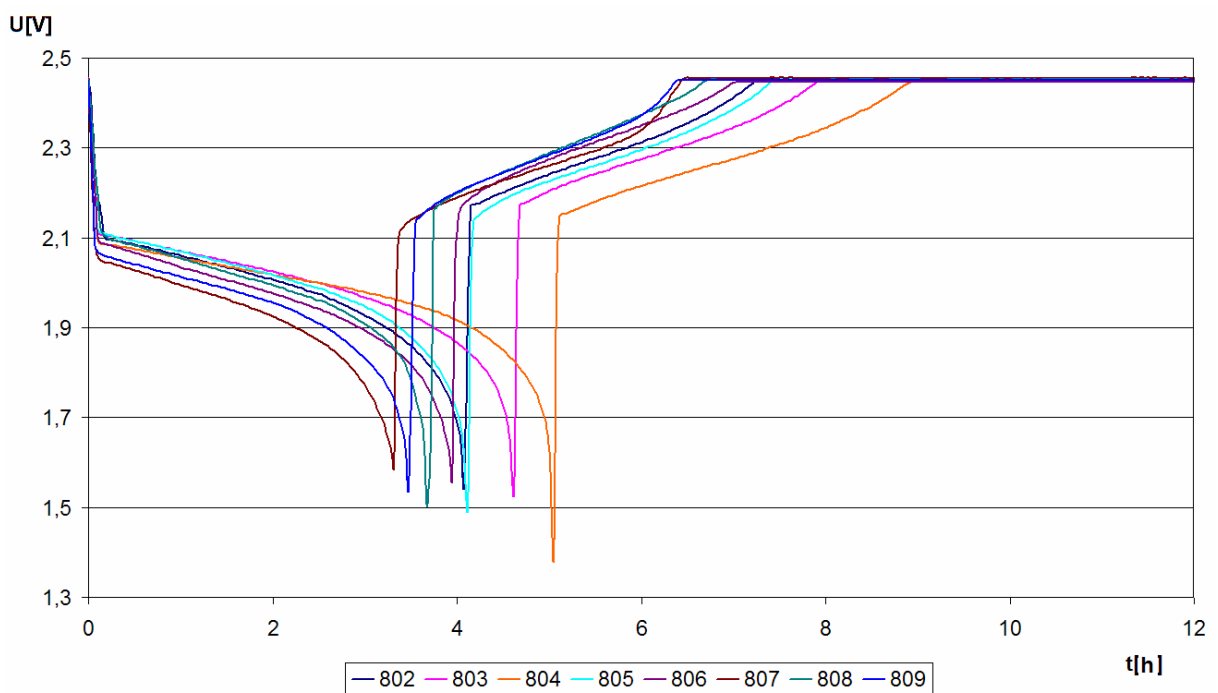
**Obr. 6.5** Průběhy napětí na konci vybíjení na dvanácti měřených člancích v režimu PSoC



**Obr. 6.6** Průběhy napětí na konci nabíjení na dvanácti měřených člancích v režimu PSoC



**Obr. 6.7** Průběhy napětí, potenciálů obou elektrod, proudu a stavu nabití na jednom článku ve standardním režimu



**Obr. 6.8** Průběhy napětí na osmi článcích ve standardním cyklování

## 7 Závěr

Cílem práce bylo sestavit automatizované měřicí pracoviště a vytvořit vhodné měřicí programy pro měření experimentálních článků olověného akumulátoru v režimu PSoC a pro standardní cyklování.

Měřicí pracoviště byla sestavena dvě (**Obr. 3.5**) tak mohou probíhat dva odlišné experimenty zároveň, nebo jeden experiment současně na dvanácti článcích.

Oba měřicí programy se při testovacím provozu setkali s mnoha drobnými komplikacemi. Jedna z nich byla ošetření běhu programu po výpadku elektrické energie v rozvodné síti. Tento problém byl překonán doplněním programů o modul UPS, který zajišťuje uložení naměřených dat a bezpečné ukončení programu v případě výpadku elektrické energie v síti.

Funkčnost obou programů, i celého pracoviště byla ověřena na experimentálních článcích olověného akumulátoru vlastní výroby. Naměřené charakteristiky byly vyneseny do grafů, které jsou zobrazeny a popsány v kapitole 6.

Celé měřicí pracoviště je stále v testovací fázi. Případné drobné problémy jsou postupně odstraňovány. Oprava těchto problémů spočívá spíše v softwarové opravě některých funkcí měřicích programů.

Naměřené charakteristiky povedou k výzkumu a minimalizaci degradačních jevů, které jsou příčinou stárnutí VRLA baterií používaných v hybridních elektrických vozidlech (HEV) a elektrických vozidlech (EV). Následné zvýšení životnosti olověných akumulátorů povede ke zlepšení jejich konkurenceschopnosti mezi alternativními zdroji elektrické energie. Výkonnější olověné akumulátory s dlouhou životností sníží spotřebu alternativního paliva v HEV a tímlepší dopad těchto vozidel na životní prostředí.

## 8 Použitá literatura

- [1] CENEK, Z a spol. Akumulátory od principu k praxi – FCC public s.r.o. P
- [2] VANĚK, J., KŘIVÍK, P., NOVÁK, V. Alternativní zdroje elektrické energie - Skripta FEKT VUT Brno 2006
- [3] BAGOCKIJ, V. S., SKUNDIN A. M., Elektrotechnické zdroje proudu - STNL Praha 1987
- [4] LÁBUS R., Automatizované měřicí pracoviště pro výzkum experimentálních článků olověných akumulátorů – Diplomová práce FEKT 2006
- [5] Agilent Technologies, Inc. VEE Pro User's Guide