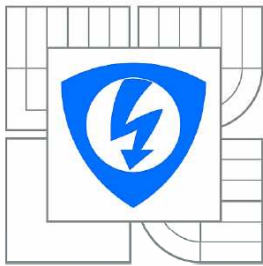


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## PREDIKCE STAVU NABITÍ OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ

STATE OF CHARGE PREDICTION OF LEAD ACID BATTERIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ CHOCHOLA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KŘIVÍK, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektrotechnická výroba a management

**Student:** Bc. Ondřej Chochola

**ID:** 89428

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Predikce stavu nabití olověných akumulátorů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s příčinami degradace olověných akumulátorů v hybridních elektrických vozidlech. Prozkoumejte možnosti predikce stavu nabití olověných akumulátorů pomocí metody proudových pulzů. Osvojte si základy práce s programem VEE Pro 8.0. Vytvořte program umožňující aplikaci proudových pulzů a kontinuální záznam napětí olověného akumulátoru. Výsledné napěťové závislosti při různých stavech nabití (SoC) olověného akumulátoru porovnejte a stanovte vhodnost metody proudových pulzů pro určení stavu nabití olověného akumulátoru.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 27.5.2010

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

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt:**

Základní zaměření práce je detailní zkoumání možnosti predikce stavu nabití olověných akumulátorů pomocí metody proudových pulzů. Metodika práce sestává z testování pokusného článku pomocí pulzního nabíjení a vybíjení při současné změně nabíjecího a vybíjecího proudu, stejně jako délky nabíjecích a vybíjecích časů. Testování probíhá při různém stavu nabití akumulátoru. Cílem práce je porovnání výsledných napěťových závislostí a stanovení vhodnosti použití metody proudových pulzů pro určení stavu nabití olověných akumulátorů.

## **Abstract:**

The general aim of the thesis is a detailed examination of battery charging condition possibility of lead-acid accumulator with the help of pulse current method. The methodology consists of experimental cell testing by pulse battery charging and pulse battery discharging during a progressive change of charging and discharging current as well as charging and discharging time change. The testing procedure proceeds at a various battery charging condition. Principal aim of this work is to compare final voltage dependencies and to establish the usability of pulse current method to determine battery charging condition.

## **Klíčová slova:**

Stav nabití akumulátoru, metoda proudových pulzů, pokusný článek, porovnat, vhodnost, určit.

## **Keywords:**

Battery charging condition, pulse current method, experimental cell, to compare, usability, to determine

## Bibliografická citace díla:

CHOCHOLA, O. Predikce stavu nabití olověných akumulátorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 48 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 27. 5. 2010

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce.

Úvod .....	7
1 Olověné akumulátory .....	8
1.1 Konstrukce olověného akumulátoru .....	9
1.2 Základní elektrochemické reakce .....	11
1.3 Fyzikální změny probíhající v akumulátorech .....	11
1.4 Napětí olověného akumulátoru.....	12
1.5 Kapacita olověného akumulátoru .....	14
1.5.1 Vliv vybíjecího proudu .....	14
1.5.2 Vliv teploty .....	14
1.6 Startovací baterie .....	15
1.7 Trakční baterie .....	17
1.8 Staniční baterie .....	18
1.9 Gelové baterie.....	19
2 Účinnost akumulace elektrické energie .....	20
3 Měrná energie.....	21
4 Životnost akumulátorů .....	21
4.1 Sulfatace .....	22
4.2 Formování elektrod.....	22
5 Nabíjecí a vybíjecí charakteristiky.....	23
6 Určení stavu nabití akumulátoru .....	25
7 Praktická část.....	26
7.1 Testovací článek .....	26
7.2 Testovací pracoviště .....	27
7.2.1 Program Agilent Vee Pro 8.0.....	27
7.2.2 Program pro testování pulzním proudem.....	28
7.3 Srovnání napěťových charakteristik v závislosti na délce nabíjecích a vybíjecích pulzů pro různé stavy nabití a různé nabíjecí proudy.....	29

7.3.1 Stav nabití 0 % .....	30
7.3.2 Stav nabití 25 % .....	32
7.3.3 Stav nabití 75 % .....	33
7.3.4 Stav nabití 100 % .....	34
7.4 Srovnání napěťových charakteristik pro různé stavy nabití a pro konstantní čas nabíjení a vybíjení 500 ms.....	35
7.5 Srovnání napěťových charakteristik pro různé proudy a pro konstantní čas nabíjení a vybíjení 500 ms .....	37
7.5.1 Nabíjení, vybíjení.....	37
7.5.2 Vybíjení, nabíjení.....	39
7.6 Srovnání napěťových charakteristik pro kladnou a zápornou elektrodu pro různý stav nabití a pro konstantní čas nabíjení a vybíjení 500 ms.....	41
7.7 Srovnání napěťových charakteristik kladné a záporné elektrody pro konstantní čas nabíjení a vybíjení 500 ms.....	43
7.8 Odhad stavu nabití článku .....	45
8 Závěr.....	46
9 Seznam použité literatury.....	48

# Úvod

S elektrickou energií se lidé setkávali až do konce 18. století jen velmi ojediněle. Jednalo se téměř vždy o indukování a akumulování elektrostatického výboje. Zvrat nastal až roku 1800, kdy italský vědec a vynálezce Alessandro Volta sestrojil první elektrochemický zdroj proudu, tzv. Voltův sloup. Ve své podstatě se jednalo o první prototyp galvanického článku. Základem článku byly diskové elektrody ze stříbra a zinku, které byly proloženy lepenkovými deskami napuštěnými vodou. Napětí tohoto článku bylo pouze 0,2 až 0,4 V.

Zásadní obrat v akumulaci energie přinesl roku 1859 francouzský vědec Gaston Planté. Podařilo se mu vyrobit článek, složený ze dvou olověných desek. Mezi tyto desky vložil jednoduchý separátor, vytvořený z plátěné tkaniny a celou sestavu ponořil do roztoku kyseliny sírové. Následně zjistil, že při nabíjení se na kladné elektrodě elektrochemickou reakcí vytvořila vrstva  $\text{PbO}_2$  a na záporné elektrodě olověná houba. Jelikož bylo možné článek po vybití pomocí vnějšího zdroje opět nabít, jednalo se o první sekundární článek, tzv. akumulátor. Napětí tohoto článku bylo přibližně 2 V.

Neustále se zvyšují požadavky na akumulaci energie. Z toho důvodu se vyvíjejí pomocí nejnovějších technologií systémy, které by měly být schopné akumulovat co největší množství energie při minimálních ztrátách. Velmi důležitým faktorem je vysoká spolehlivost a maximální životnost akumulátoru.

Cílem předložené práce je zkoumání možnosti predikce stavu nabití olověných akumulátorů pomocí metody proudových pulzů. Jedná se především o testování pokusného článku pomocí pulzního nabíjení a vybíjení. Dochází ke změně nabíjecího a vybíjecího proudu a délky nabíjecích a vybíjecích pulzů. Testování probíhá při různém stavu nabití akumulátoru.

Práce se skládá z teoretické a praktické části. Teoretická část má za úkol objasnit princip funkce, použití, přednosti a nedostatky olověných akumulátorů. Praktická část se zabývá testováním zkušebního článku a vyhodnocením napěťových závislostí. Výsledkem je stanovení vhodnosti použití metody proudových pulzů pro určení stavu nabití olověných akumulátorů.

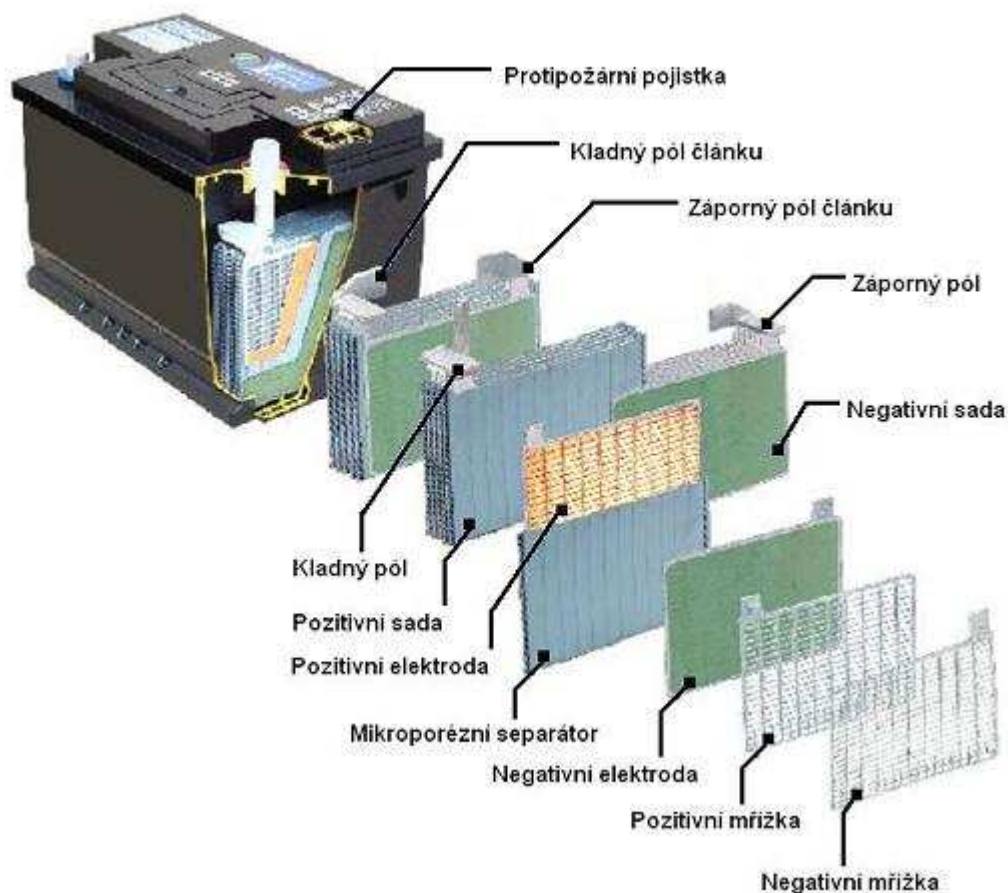
# 1 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory jsou nejpoužívanější sekundární elektrochemický zdroj proudu. Vyrábějí se o kapacitách řádově od 1 do 10 000 Ah. Důvodem je dobře zvládnutá technologie výroby olověných akumulátorů, relativně nízká pořizovací cena, provozní spolehlivost, dobrá účinnost i dostatečný výkon. Roční celosvětová spotřeba olova pro výrobu akumulátorů se pohybuje kolem 2,5 milionů tun, z toho část olova se získává recyklací již vyřazených akumulátorů. [1]

Pro použití olověných akumulátorů jsou nejvhodnější středně výkonné a výkonné systémy, kde velikost akumulátoru není tou nejdůležitější vlastností. Akumulátory musí být schopné rychlého příjmu elektrického náboje, ale také rychlého a spolehlivého výdeje elektrického náboje, což se týká především startování automobilu. Nejčastější životní fází olověného akumulátoru je tzv. částečné nabití, kdy se akumulátor nachází přibližně v 50 % stavu nabití. V důsledku chemických reakcí, které se vyskytují uvnitř akumulátoru při částečném nabití, dochází k jeho samovolnému ničení, což je velký problém, který je nutno řešit a to zvláště v dnešní době, kdy se zásoby ropy ve světě snižují a doba, kdy bude elektrický pohon automobilů v tzv. hybridních vozidlech nevyhnutelný, je takřka za dveřmi. [1]

## 1.1 Konstrukce olověného akumulátoru

Olověný akumulátor se skládá z jedné kladné a jedné záporné elektrody, elektrolytem je roztok  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Části olověného akumulátoru jako autobaterie jsou zobrazeny na obr. 1. [2]



Obr. 1: Celková sestava olověného automobilového akumulátoru [5]

Jednotlivé molekuly  $\text{H}_2\text{SO}_4$  jsou ve vodě rozštěpeny (disociovány) na záporné ionty síranové a kladné ionty vodíkové do 1. stupně ( $\text{H}^+$  a  $\text{HSO}_4^-$ ) a zčásti do 2. stupně ( $2\text{H}^+$  a  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Nabitá záporná elektroda obsahuje Pb (olovo) a kladná elektroda  $\text{PbO}_2$  (oxid olovičitý). [2]

Při průchodu proudem 1 Ah při vybíjení zreaguje teoreticky v akumulátoru toto množství materiálů [2]:

Kladná elektroda:  $4,46 \text{ g PbO}_2 \rightarrow 5,66 \text{ g PbSO}_4$

Záporná elektroda:  $3,87 \text{ g Pb} \rightarrow 5,66 \text{ g PbSO}_4$

Elektrolyt:  $3,66 \text{ g H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 0,67 \text{ g H}_2\text{O}$

Celkem:  $11,99 \text{ g} \rightarrow 11,99 \text{ g}$

Vybíjením je v elektrolytu spotřebovávána nejen  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , ale také je tvořena  $\text{H}_2\text{O}$ , tím dochází k zředování elektrolytu a ke snížení jeho vodivosti. Na kladné a záporné elektrodě se tvoří  $\text{PbSO}_4$  (síran olovnatý) a tím se prudce snižuje vodivost akumulátoru, současně roste jeho vnitřní odpor a klesá napětí. K opačné reakci dochází při nabíjení. [2]

Na konci nabíjení záporné elektrody po přeměně většiny síranu olovnatého, prudce vzroste elektrodový potenciál (a napětí akumulátoru) a začne se tvořit vodík. Na kladné elektrodě se produkuje malé množství kyslíku už v průběhu nabíjení. Výťažnost elektrody je proto pouze 85 až 90 % kapacity. K získání plné vybíjecí kapacity je třeba dodat po zvýšení napětí ještě další náboj (10 až 20 % kapacity). Toto přebíjení je doprovázeno mohutnou tvorbou kyslíku a vodíku. Příliš silné plynování je však pro akumulátor velmi nepříznivé a výrazně zkracuje jeho životnost. [2]

## 1.2 Základní elektrochemické reakce

### Elektrolyt:

Elektrolytem v olověných akumulátorech je vodou zředěná kyselina sírová, která disociuje na sírové ionty se záporným elektrickým nábojem a vodíkové ionty s kladným elektrickým nábojem, převážně do 1. stupně:  $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{HSO}_4^- + \text{H}^+$  a z části až do 2. stupně:  $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$

Ionty rozštěpené kyseliny sírové reagují při vybíjení s aktivními materiály elektrod, jak je uvedeno dále. [1]

### Záporné elektrody:

Jejich aktivní hmotou je porézní (houbovitě) olovo. Při vybíjení uvolňují elektrony:  $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$  a reagují se zápornými ionty kyseliny sírové (oxidují) za vzniku sulfátu (síranu) olovnatého.

Zjednodušeně znázorněno:  $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$ . [1]

### Kladné elektrody:

Jejich aktivní hmotou je oxid olovičitý ( $\text{PbO}_2$ ) v modifikacích  $\alpha$  a  $\beta$ . Elektrony, které jsou při vybíjení uvolňovány zápornými elektrodami, putují vnějším uzavřeným elektrickým obvodem ke kladným elektrodám. Současně se oxid olovičitý redukuje za vzniku síranu olovnatého a vody:  $\text{PbO}_2 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ . [1]

## 1.3 Fyzikální změny probíhající v akumulátorech

Během vybíjení dochází k mechanickému namáhání elektrod tvořícím se síranem olovnatým, který má větší objem než aktivní materiály v nabitěm stavu. Se stupněm vybití se zmenšuje i poréznost elektrod. To vede ke zpomalování difuze iontů kyseliny sírové do aktivních hmot. Hustota (měrná hmotnost) kyseliny sírové v elektrodách je proto během vybíjení menší než v elektrolytu. Rozdíl je tím větší, čím větším proudem je akumulátor vybíjen, čím jsou elektrody tlustší a čím více je akumulátor vybit. [1]

Sulfát (síran) olovnatý  $\text{PbSO}_4$  má velmi špatnou elektrickou vodivost, a proto s přibývajícím sulfátem vzrůstá vnitřní elektrický odpor akumulátoru. Objem elektrolytu klesá se stupněm vybití přibližně o  $1 \text{ cm}^3$  na  $1 \text{ Ah}$ . [1]

Ionty kyseliny sírové při vybití akumulátoru reagují s aktivními hmotami elektrod, proto klesá hustota elektrolytu a tento pokles je přímo úměrný stavu vybití akumulátoru. Podle hustoty elektrolytu tedy můžeme zjišťovat stupeň vybití (nabití) oloveného akumulátoru. Hustota elektrolytu také ovlivňuje bod mrznutí elektrolytu. Jestliže nabitě akumulátory snášejí bez poškození teploty pod  $-25 \text{ °C}$ , elektrolyt vybitých akumulátorů může zamrznout a poškodit je například při  $-10 \text{ °C}$  a u hluboce vybitých akumulátorů i při teplotě nad  $-5 \text{ °C}$ . [1]

Nedojde-li následkem nesprávného provozu a údržby ke vzniku nevratné sulfatace aktivních materiálů, je průběh reakcí vratný. Během nabíjení je hustota kyseliny v elektrodách větší než hustota kyseliny v elektrolytu, a to tím více, čím většími proudy jsou akumulátory nabíjeny. Se zvyšováním napětí nabíjených akumulátorů vzrůstá následkem elektrolýzy vody v elektrolytu i vývoj výbušné směsi kyslíku a vodíku. Kyslík unikající v podobě bublinek z pórů aktivní hmoty kladných elektrod utrhuje málo soudržné částice  $\text{PbO}_2$  a způsobuje korozi nosných částí těchto elektrod tím více, čím vyšší je konečné napětí akumulátoru a čím déle jsou akumulátory při tomto napětí přebíjeny. [1]

## 1.4 Napětí oloveného akumulátoru

**Jmenovité napětí článku  $U_N$**  je přibližně  $2,00 \text{ V}$ . Pro určení jmenovitého napětí baterie se sériově spojenými články stačí vynásobit jmenovité napětí článku počtem článků baterie. [1]

**Napětí naprázdno  $U_0$**  je závislé na hustotě elektrolytu. Pro účely praxe lze jeho hodnotu ve voltech přibližně vypočítat podle jednoduchého vzorce:  $U_0 = 0,84 + \rho$ , kde  $\rho$  je hustota elektrolytu v  $\text{g/cm}^3$  při teplotě  $+20 \text{ °C}$ . [1]

Závislost napětí na teplotě vyjadřuje teplotní součinitel napětí nezapojeného zdroje. V případě oloveného akumulátoru je tento součinitel asi  $2,6 \text{ mV/°C}$  (při vyšší teplotě je napětí vyšší). Před měřením napětí naprázdno je nutné vyčkat vždy nejméně jednu hodinu po nabití (vybití) akumulátoru, aby se vyrovnala hustota kyseliny v elektrodách a elektrolytu. [1]

**Nabíjecí napětí**  $U_{nab}$  je vyšší než napětí naprázdno. U nabíjeného akumulátoru jsou významná tyto napětí [1]:

1) Plynovací napětí je napětí 2,4 V na článek, při kterém olověný akumulátor začíná intenzivněji plynovat následkem elektrolýzy vody v elektrolytu za vzniku vodíku a kyslíku. Se vzestupem napětí se elektrolýza vody dále výrazně zvyšuje.

2) Konečné nabíjecí napětí je napětí, kterého dosáhne akumulátor po plném nabití na konci nabíjení. S pokračujícím nabíjením konstantním proudem se již jeho hodnota nemění. Podle vnitřního elektrického odporu akumulátoru, teploty a velikosti nabíjecího proudu bývá v rozmezí 2,4 V až 2,8 V na článek. U uzavřených akumulátorů řízených ventilem se nesmí překročit tyto hodnoty [1]:

při pohotovostním provozu	2,25 V až 2,30 V/článek při 20 °C
při cyklickém provozu	2,40 V až 2,47 V/článek při 25 °C

Překročení těchto limitů vede ke snížení kapacity, zkrácení životnosti akumulátoru a v krajních případech i k destrukci akumulátorových nádob.

**Vybíjecí napětí**  $U_{vyb}$  je vždy nižší, než napětí naprázdno. Rozdíl je tím větší, čím větším proudem je akumulátor vybíjen, čím má větší vnitřní odpor a čím menší je provozní teplota. [1]

**Konečné vybíjecí napětí** je předepsaná hodnota napětí akumulátoru, při které je vybíjení považováno za ukončené. Toto napětí závisí na intenzitě vybíjecího proudu a vnitřním elektrickým odporu akumulátoru. Vybíjení na nižší hodnotu napětí, než udává výrobce pro příslušný vybíjecí proud, způsobuje hluboké vybití, které snižuje kapacitu a zkracuje celkovou životnost akumulátoru. [1]

Nejsou-li pro velmi malé vybíjecí proudy k dispozici potřebné údaje výrobce, dbáme, aby se z baterie neodebíral větší náboj, než je její jmenovitá kapacita. Nelze-li to zjistit z důvodu kolísání nebo přerušování odběru proudu, pak hustota elektrolytu nesmí klesnout pod hodnotu stanovenou výrobcem, nebo zjištěnou při vybíjení do konečného napětí za jmenovitých podmínek. [1]

## 1.5 Kapacita olověného akumulátoru

Kapacita akumulátoru je jeho schopnost dodávat určitou elektrickou energii v požadované době do poklesu napětí na minimální přípustnou hodnotu. Udává se v ampérhodinách (Ah). Využitelná kapacita je vždy menší, než teoretická. Navíc se část elektrického náboje nevybíjí a ponechává se v akumulátorech, aby se hlubokým vybíjením příliš nezkracovala jejich životnost. Kapacitu akumulátorů ovlivňuje velikost vybíjecího proudu a teplota. [1]

### 1.5.1 Vliv vybíjecího proudu

S narůstajícím vybíjecím proudem dochází k většímu zatížení povrchové vrstvy aktivních materiálů. Vznikající sulfát olovnatý  $PbSO_4$  je objemnější, ucpává póry v povrchové vrstvě a tím zhoršuje využití hlubších vrstev aktivních hmot elektrod. Proto při nárůstu vybíjecích proudů klesá využitelná kapacita akumulátoru a zkracuje se doba, po kterou může být akumulátor vybíjen. Pokles kapacity se vzrůstem vybíjecích proudů závisí na konstrukci a tloušťce elektrod a na vnitřním elektrickém odporu akumulátorů. [1]

### 1.5.2 Vliv teploty

Při teplotách nad  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  kapacita akumulátorů mírně vzrůstá, ale zvyšují se ztráty samovybíjením a zkracuje se životnost akumulátorů. Například trvale zvýšená teplota o  $10\text{ }^\circ\text{C}$  může zkrátit životnost olověných akumulátorů až o 50 %. Na vzestup teploty jsou zvláště náchylné akumulátory řízené ventilem. Při nízkých teplotách klesá kapacita akumulátorů přibližně o 1 % na  $1\text{ }^\circ\text{C}$ . Pokles kapacity není s poklesem teploty lineární a navíc závisí také na velikosti vybíjecího proudu (je výraznější při vybíjení většími proudy). Na pokles kapacity za nízkých teplot jsou náchylnější záporné elektrody. Proto se pro zlepšení jejich činnosti přidávají během výroby do aktivních materiálů elektrod různé typy expandérů, které současně zajišťují udržení potřebné porézności během celé doby života akumulátorů. S poklesem teploty se snižuje také nabíjecí schopnost akumulátorů a nelze je proto plně nabít. [1]

## 1.6 Startovací baterie



Obr. 2: Příklad startovací baterie [6]

Vyrábějí se pro spouštění zážehových a vznětových spalovacích motorů. Jejich využití nejvíce zaznamenal automobilový průmysl, ale také letectví a lodní doprava. Hlavní požadavky na startovací baterie jsou velká měrná kapacita a schopnost dodat vysoké proudy po krátký čas. Za běžných podmínek pracují startovací akumulátory ve vyrovnávacím režimu, což znamená, že pokud dojde k vybití malé části kapacity, potřebné k nastartování motoru, baterie se opět dobije pomocí dobíjecí soustavy za provozu vozidla. Příklad startovací baterie je patrný na obrázku 2. [4]

Startovací baterie jsou vyráběny z tenkých napastovaných elektrodoých desek, jejichž tloušťka je 1,1 mm až 5 mm pro kladné elektrody a 1 mm až 3,5 mm pro záporné elektrody. Kromě tradičních mřížek z Pb – Sb se na výrobu mřížek používají mimo jiné také slitiny Pb – Ca – Sn, popř. se obě slitiny kombinují, čímž je dosaženo lepších vlastností baterie. Obě soustavy desek jsou propojeny olověnými můstky, k nimž jsou desky připájeny svými praporce. Systém elektrod a separátorů tvoří mechanicky pevný celek bez pohyblivých součástí. Tímto uspořádáním bylo dosaženo vysoké mechanické odolnosti baterií, která je při náročných provozních podmínkách velmi důležitá. Odizolované monobloky jsou

prostřednictvím olověných propojek vzájemně sériově propojeny, čímž je konečné napětí baterie rovno součtu napětí jednotlivých článků. Monobloky jsou naplněny kapalným elektrolytem  $H_2SO_4$ , jehož hustota je  $1,28 \text{ g/cm}^3$ . [4]

Nově vyrobený akumulátor může být dodáván jako nabitý s elektrolytem, nenabitý v suchém stavu, nebo nabitý v suchém stavu. Pokud se jedná o akumulátor naplněný elektrolytem a v nabitém stavu, je možná jeho okamžitá instalace do vozidla a uvedení do provozu. Kontrola se týká pouze stavu nabití a těsnosti pouzdra. [4]

Akumulátory v suchém a nenabitém stavu jsou dodávány pouze v případě jejich očekávaného dlouhodobého skladování. Naplněný akumulátor trpí při dlouhodobém skladování samovybíjením a dochází k postupné degradaci elektrod. Po naplnění akumulátoru by mělo být umožněno elektrolytu vniknutí do všech pórů desek, aby se následného nabíjení mohlo zúčastnit co nejvíce aktivní hmoty. To je dosaženo ponecháním akumulátoru před nabíjením 3 až 5 hodin v klidu. Uvedená doba stání by se neměla prodlužovat, aby nedocházelo k sulfataci elektrod a znehodnocování akumulátoru. Akumulátor je poté nabíjen proudem, odpovídajícím jedné desetíně jeho kapacity po dobu asi 50 hodin, až do úplného nabití. [4]

Suchý nabitý akumulátor je naplněn elektrolytem o předepsané hustotě a nechá se po dobu 3 hodin stát, čímž je dosaženo dokonalé proniknutí elektrolytu do všech pórů aktivního materiálu elektrod. Akumulátor je potřeba vždy nabíjet do plného stavu, který odpovídá napětí  $2,8 \text{ V/článek}$ . [4]

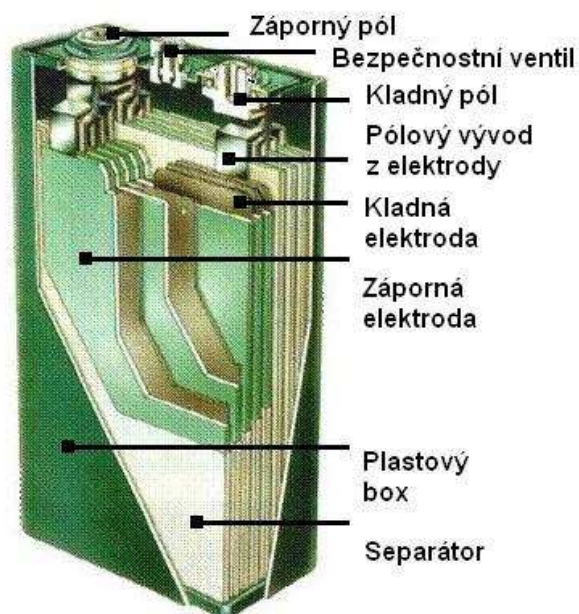
Během samovybíjení ztrácí klasický olověný akumulátor celý náboj asi za 3 měsíce. Tato doba se mění v závislosti na znečištění elektrolytu. Při dlouhodobém skladování akumulátoru v naplněném stavu je třeba trvalého dobíjení proudem rovnajícím se jedné tisícíně kapacity akumulátoru. Trvalým dobíjením je zajištěna možnost okamžitého použití, a také vyloučena možnost zamrznutí, čímž by došlo k mechanickému poškození obalu i elektrod a tím ke kompletnímu znehodnocení. [4]

## 1.7 Trakční baterie

Jsou navrženy pro napájení pohonu elektrických vozidel, zejména elektromobilů, elektrických skútrů, invalidních vozíků a manipulačních vozíků. [4]

Během vývoje a výroby trakčních baterií byl brán hlavní důraz na maximální životnost v provozu, kdy dochází k cyklickému nabíjení a vybíjení baterií. Dělí se podle velikosti na akumulátory pro malou trakci a akumulátory pro velkou trakci. Mohou pracovat v rozsahu teplot - 20 °C až 45 °C. Podle konstrukce kladných elektrod rozlišujeme trakční akumulátory s trubkovými elektrodami a mřížkovými elektrodami. Pro malou trakci se konstruují akumulátory s kapacitou 12 Ah až 180 Ah o napětí 6 V až 12 V. Vnější vzhled připomínají akumulátory malé trakce akumulátory startovací. Pro velkou trakci se konstruují akumulátory s kapacitou 110 Ah až 1500 Ah o napětí 2 V. Články jsou umístěny do plastových nebo ocelových boxů a jsou sériově propojeny, čímž je dosaženo napětí nejčastěji 24 V, 48 V a 80 V. [4]

Trakční akumulátory s kladnými trubkovými elektrodami jsou nejrozšířenější. Detail je znázorněn na obrázku 3. Jsou schopné poskytnout více jak tisíc nabíjecích a vybíjecích cyklů, než jejich kapacita poklesne na hodnotu 80 %. [4]



Obr. 3: Příklad trakční baterie [7]

Mřížkové elektrody trakčních akumulátorů jsou konstrukčně velmi podobné mřížkovým elektrodám startovacích akumulátorů. Hlavní rozdíl je ale v tloušťce elektrod, kdy startovací akumulátory mají dvojnásobnou tloušťku a větší plochu elektrod. Trakční akumulátory s mřížkovými elektrodami jsou levnější než akumulátory s kladnými trubkovými elektrodami. Jejich životnost v cyklech je ale menší. [4]

## 1.8 Staniční baterie

Jsou navrženy jako nouzové zdroje energie v případě přerušení dodávky proudu v důsledku poruchy v elektrorozvodné síti. Používají se jednak v energetice, ale také ve zdravotnických zařízeních, ve finančních ústavech, ve školství, v dopravě a všude tam, kde by náhlý a dlouhodobý výpadek proudu mohl způsobit škody. Hlavním požadavkem na staniční baterie je velmi vysoká spolehlivost a životnost. Akumulátory se trvale dobíjí na hodnotu napětí 2,23 V až 2,30 V na článek. Kapacita staničních akumulátorů se pohybuje v intervalu od 1 Ah do 10 000 Ah. Příklad staniční baterie je na obrázku 4. [4]



**Obr. 4:** Příklad staniční baterie [8]

## 1.9 Gelové baterie

Gelové baterie se vyznačují velmi vysokou životností a spolehlivostí, a to i za extrémních podmínek, například provozem za vysokých teplot, nebo při hlubokém vybíjení. Další kladnou vlastností je možnost dlouhodobého skladování baterií v nabitém stavu, aniž by docházelo k samovybíjení. [4]

Pro konstrukci gelových baterií se používají jak ploché, tak i trubkové elektrody. Do elektrolytu je někdy přidána kyselina fosforečná, která způsobuje na povrchu oxidu olovičitého modifikaci růstu krystalu, ale také zabraňuje tvorbě pasivační vrstvy mezi mřížkou a kladnou aktivní hmotou. [4]

Imobilizace elektrolytu je provedena zgelováním, kdy je jako gelatizační činidlo použit oxid křemičitý s velkým povrchem. Primární částičky jsou velice malé a v článku vytváří trojrozměrnou síťovanou strukturu. Zgelováním je proces, kdy dochází ke smíchání elektrolytu s oxidem křemičitým. Mícháním tuto směs udržíme na nízké úrovni viskozity. Dochází k zesíťování primárních shlukovaných částiček oxidu křemičitého, ale směs má stále charakter kapaliny, kterou je možné naplnit článek. Později dochází ve směsi k tvorbě trojrozměrné struktury, tuhnutí a vytvoření pevného gelu. Důležitou výhodou gelové struktury je schopnost bránění tvorby stratifikace elektrolytu, a to i v případě velkých článků s velkými plochými elektrodami umístěnými ve svislé poloze. Stratifikace elektrolytu je problémem konvenčních baterií. Řešením je přebíjení, čímž dochází k silnému plynování, nebo použití elektrodového míchacího systému. Gelové baterie našly své uplatnění především v oblasti telekomunikací. Lze je také využívat pro staniční aplikace, kdy pohotovostní režim vyžaduje občasně úplné vybití baterií. Příklad gelové baterie znázorňuje obrázek 5. [4]



**Obr. 5:** Příklad gelové baterie [9]

## 2 Účinnost akumulace elektrické energie

Tato účinnost udává, jak efektivně může akumulátor elektrickou energii akumulovat a následně vydávat. Účinnost akumulace klesá se zvyšováním nabíjecího a vybíjecího proudu, s poklesem teplot a stárnutím akumulátoru. [1]

**Ampérhodinová (proudová) účinnost** je poměrem náboje odebraného při vybíjení článku nebo baterie k velikosti náboje potřebného na obnovení počátečního stavu nabití. Vypočítá se podle vzorce:  $\eta_{Ah} = Q_{vyb} / Q_{nab} \times 100$  (% , Ah, Ah). [1]

**Watt hodinová (energetická) účinnost** je poměrem elektrické energie získané při vybíjení článku nebo baterie vybíjením k energii dodané akumulátoru nabíjením. Vypočítá se podle vzorců:  $\eta_{Wh} = Q_{vyb} U_{vyb} / Q_{nab} U_{nab} \times 100$  (% , Ah, V, Ah, V)

$$\eta_{Ah} = W_{vyb} / W_{nab} \times 100 \text{ (% , Ah, Ah). [1]}$$

kde:  $Q_{vyb}$  je elektrický náboj uvolněný akumulátorem při vybíjení (Ah)

$U_{vyb}$  je střední napětí při vybíjení (V)

$Q_{nab}$  je elektrický náboj dodaný akumulátoru nabíjením (Ah)

$U_{nab}$  je střední napětí při nabíjení (V)

Účinnost systému v poměrovém vyjádření je vždy menší než 1. Je-li vynásobena číslem 100, jde o účinnost v procentech – v tom případě je vždy menší než 100 %. U olovených akumulátorů se dosahuje účinnosti  $\eta_{Ah}$  až 85 % a  $\eta_{Wh}$  až 65 %. [1]

### 3 Měrná energie

Měrná energie akumulátorů udává, kolik elektrické energie (Wh) můžeme získat z hmotnosti 1 kg, popř. z 1 dm<sup>3</sup> objemu akumulátoru. Nejvyšší měrné energie (82 Wh/kg až 85 Wh/kg) a nejvyšší hustoty energie (23 Wh/dm<sup>3</sup> až 40 Wh/dm<sup>3</sup>) dosahují startovací a trakční akumulátory, u kterých se požaduje minimální hmotnost a objem. Nejmenších hodnot dosahují staniční akumulátory s velkopovrchovými (Plantého) elektrodami (měrná energie 13,5 Wh/kg a hustota energie 38,2 Wh/dm<sup>3</sup>). U staničních akumulátorů nejsou zpravidla větší hmotnost a objem na závadu. Prioritou u nich bývá vysoká provozní spolehlivost a dlouhá životnost baterií v provozu trvalého dobíjení. [1]

### 4 Životnost akumulátorů

Je závislá na konstrukci elektrod, na teplotě prostředí, použitých nabíječích a způsobu provozu akumulátorů. U akumulátorů trvale dobíjených se udává v rocích, u akumulátorů pracujících v cyklickém provozu se udává v počtu cyklů, u startovacích akumulátorů v počtu startů. Za konec životnosti se považuje pokles kapacity na 80 % jmenovité hodnoty, nebrání-li tomu provozní podmínky, připouští se i větší pokles kapacity akumulátorů. Životnost akumulátorů limitují kladné elektrody, které jsou náchylnější k uvolňování méně soudržné aktivní hmoty PbO<sub>2</sub> a ke korozi proudových kolektorů. Při uvedení do činnosti nedosahuje kapacita kladných elektrod 100 %. Kapacita elektrod pozvolna roste během jejich provozu. Maxima dosahuje v 1/3 až 1/2 životnosti a pak pozvolna klesá. Záporné elektrody dosahují maximální kapacity na počátku provozu akumulátorů. [1]

Záporné elektrody mají delší životnost než kladné. To umožňovalo u dřívějších akumulátorů s velkopovrchovými elektrodami výměnu kladných elektrod po skončení jejich životnosti. Tím se životnost akumulátorů prodloužila téměř dvojnásobně. V současné době se vyrábějí kompaktní akumulátory, které nelze upravovat. Životnost elektrod obou polarit je téměř stejná. [1]

## 4.1 Sulfatace

Je-li olověný akumulátor skladován ve vybitém stavu, nebo je systematicky nedostatečně nabíjen, dochází k velmi nežádoucímu procesu, k tzv. sulfataci elektrod (zvláště záporných). Sulfatace spočívá v postupné přeměně jemně zrnitého síranu olovnatého v tvrdou hutnou vrstvu hrubozrnného síranu. Akumulátor se sulfatovanými elektrodami se velmi obtížně nabíjí, protože nabíjecím proudem se spíše vyvíjí vodík na záporné elektrodě, než redukuje síran olovnatý. [3]

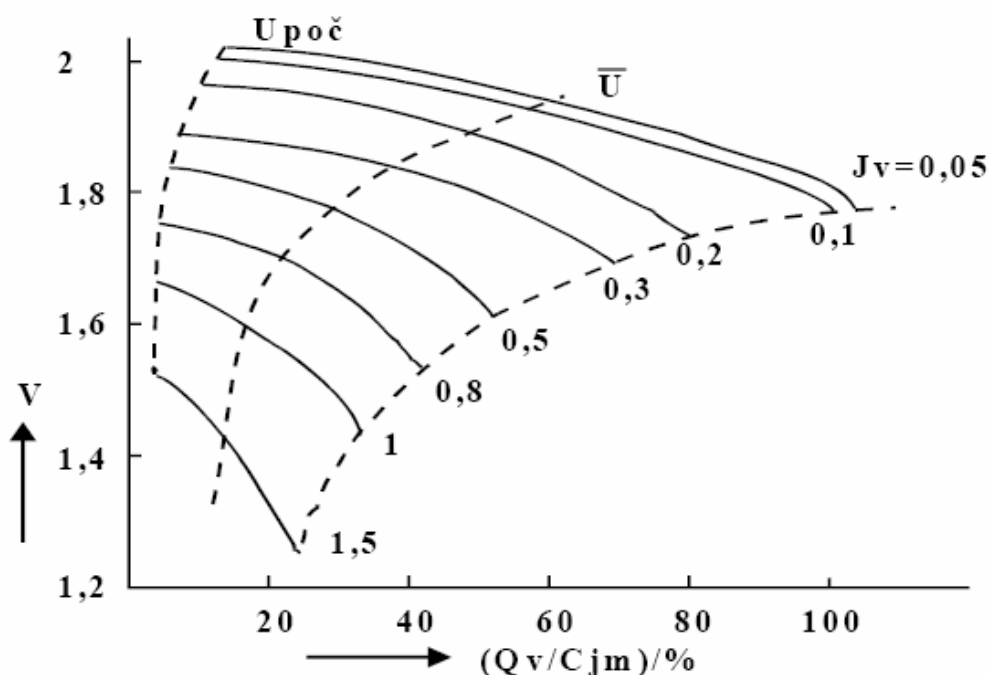
Sulfataci lze zabránit pravidelným dobíjením akumulátorů. Kapacita akumulátoru se sulfatovanými elektrodami se zčásti obnoví naplněním zředěnou kyselinou sírovou (v níž je rozpustnost síranu olovnatého větší), nebo dokonce destilovanou vodou a nabíjením akumulátoru velmi malými proudy, odpovídajícími  $I_N = 0,01$  A. Vznikající kyselina se pravidelně vyměňuje za zředěnější kyselinu, nebo za vodu. [3]

## 4.2 Formování elektrod

Formováním elektrod je proces, kdy dochází k vytvoření aktivní hmoty na elektrodách při výrobě. Tento proces je v podstatě jen mnohonásobné nabíjení a vybíjení, čímž dojde ke zvětšení povrchu elektrod. Elektrody se formují v roztoku kyseliny sírové. Výsledkem jsou vrstvy oxidu olovičitého a olověné houby, které se střídavě tvoří na povrchu desky. Tento proces definoval již samotný vynálezce Gaston Planté. [3]

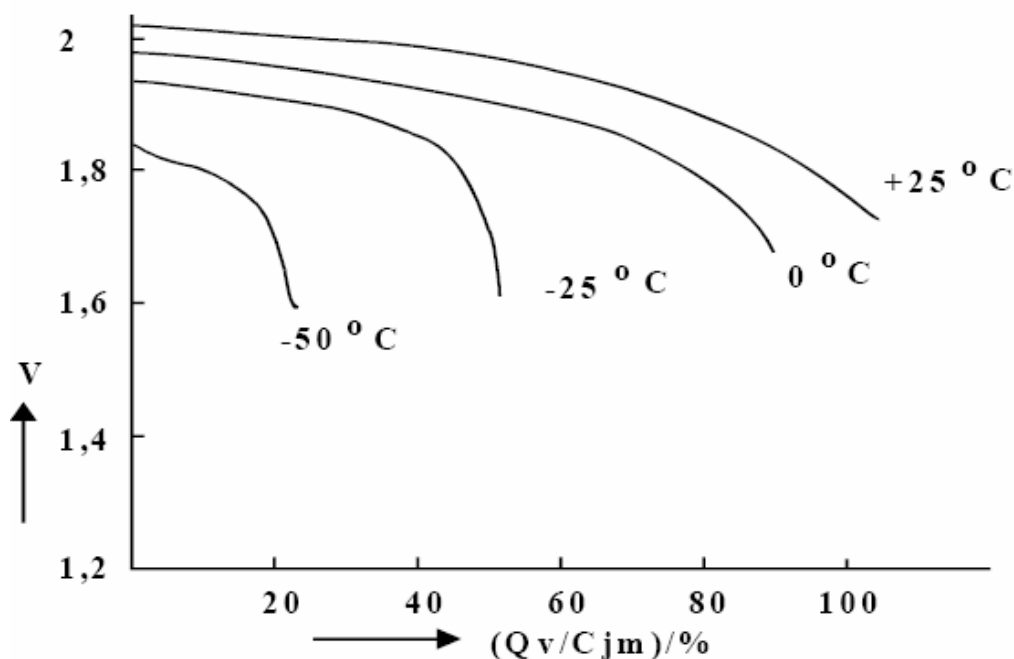
## 5 Nabíjecí a vybíjecí charakteristiky

Typické vybíjecí křivky startovacích akumulátorů jsou zachyceny na obrázku 6. Zvýší-li se vybíjecí proud, značně se sníží kapacita a tudíž i měrná energie. Změna kapacity je velmi patrná dokonce už při změně  $I_N$  z 0,05 A na 0,2 A. Toto se nesmí opomenout při porovnávání parametrů akumulátorů, jelikož akumulátory různých typů mají stanovené rozdílné způsoby vybíjení. [3]



Obr. 6: Vybíjecí křivky startovacího olověného akumulátoru [3]

Na samém počátku vybíjení není napětí příliš stabilní. Proto se za výchozí napětí považuje napětí po odčerpání jen malé části kapacity, například 10 %. Konečné vybíjecí napětí je nižší zhruba o 0,2 V, než napětí výchozí a činí 1,75 až 1,8 V při malých proudech a 1,2 až 1,5 V při velkých proudech. Kapacita akumulátoru závisí také na teplotě. Pro  $I_N = 0,1$  A a teploty nad 0 °C způsobí snížení teploty o 1 °C pokles kapacity o 0,6 až 0,7 %. Při nízkých teplotách a hlavně při velkých proudech je úbytek kapacity ještě prudší, jak značí obrázek 7. [3]



**Obr. 7:** Vybíjecí křivky olověného akumulátoru při nízkých teplotách,  $I_N = 0,1 \text{ A}$  [3]

Pokud je akumulátor nabíjen konstantním proudem, roste napětí z 2,3 až na přibližně 2,7 V poté, co by měl být už nabitý. Současně začíná silné plynování. Silné plynování poškozuje aktivní plochu desek. Z toho důvodu by měl být během plynování nabíjecí proud  $I_N$  menší než 0,05 A. Často jsou akumulátory nabíjeny tak, že se proud mění po skocích. Nejdříve je proud velký, aby se nabíjecí čas zkrátil, až po dosažení napětí 2,4 V se použijí malé proudy, aby se dokončilo nabíjení elektrod. [3]

Olověné akumulátory lze nabíjet i konstantním napětím. V tomto případě je nabíjecí proud zpočátku velký a postupně se snižuje. Při  $U_N = 2,5 \text{ V}$  je k úplnému nabití akumulátoru potřeba čas nabíjení 16 až 20 hodin. Někdy se používají proudové omezovače z důvodu snížení počátečního velkého proudu. Pracuje-li akumulátor ve vyrovnávacím režimu, kdy se vybíjí jen z části, nabíjecí napětí je možné snížit až na 2,2 V, aby se snížilo plynování při přebíjení. [3]

## 6 Určení stavu nabití akumulátoru

Stav nabití akumulátoru je velmi důležitou informací v mnoha aplikacích, využívajících akumulátory jako zdroj elektrické energie. Dříve používané ochrany proti hlubokému vybití, nebo naopak přebití jsou v dnešní době nedostatečné a co nejpřesnější a rychlé určení stavu akumulátoru se stává klíčovým faktorem pro kontrolu. [10]

Z důvodu požadavku na snížení množství škodlivých emisí vypouštěných do ovzduší se v současné době rozvíjí technologie hybridních automobilů. Jedná se o vozidlo poháněné elektromotorem, který je napájen spalovacím motorem o nepříliš vysokém výkonu. [10]

Jako ekonomicky nejvýhodnější zdroj proudu pro použití v hybridních vozidlech se jeví olovený akumulátor. Je důležité, aby akumulátor byl schopen přijímat elektrický náboj i při vysokých rychlostech nabíjení. Z tohoto důvodu musí akumulátor pracovat ve stavu částečného nabití, což má ovšem za důsledek nežádoucí sulfataci elektrod, čímž dochází ke ztrátě nabíjecí schopnosti. Aby bylo možné předejít problémům nastávajícím při hlubokém vybití, nebo nabití, je velmi důležité znát aktuální a přesný stav nabití akumulátoru. [10]

Existuje mnoho metod pro měření stavu akumulátoru. Jedná se například o měření koncentrace elektrolytu, vybíjecí test a měření vnitřního odporu. Tyto metody se ale ukázaly jako velmi nepřesné a použitelné jen u některých typů akumulátorů. [10]

Metodou měření vnitřního odporu bylo zjištěno, že maximální hodnotu odporu vykazuje akumulátor na konci vybíjení, kdy jsou elektrody pokryty největším množstvím nevodivého síranu olovnatého, který vzniká na obou elektrodách jako důsledek elektrochemické reakce. [10]

Perspektivní metodou k určení stavu nabití akumulátoru se zdá být metoda měření změny napětí po krátkodobém proudovém zatížení. Akumulátor, jenž je na vysokém stupni nabití by měl vykazovat po aplikaci nabíjecího proudu významnější změnu napětí než akumulátor na nižším stupni nabití. Podobně by došlo k určení stavu akumulátoru s nízkým stupněm nabití pomocí vybíjecích proudových pulzů. Změny napětí akumulátoru po aplikaci proudových pulzů jsou důsledkem reakčních pochodů elektrodové dvojvrstvy na rozhraní aktivní hmoty a elektrolytu, a také difuzních pochodů v elektrolytu a v elektrodách. [10]

Náplní práce je sledování a porovnání přesného průběhu napěťových změn při různých velikostech proudových pulzů a při různých stavech nabití. [10]

## 7 Praktická část

### 7.1 Testovací článek

Pro účely testování a zkoumání nabíjecích a vybíjecích charakteristik akumulátoru jsem zkonstruoval vlastní olověný akumulátorový článek, který je zachycen na obrázku 8. Jedná se o velmi jednoduchou konstrukci článku, která však plně postačuje mému účelu. Článek je složen z jedné kladné elektrody o rozměrech  $40 \times 40$  mm a jedné záporné elektrody o rozměrech  $40 \times 40$  mm. K elektrodám jsou pájením připojeny dva proužky olověného plechu o tloušťce 1 mm a rozměrech  $70 \times 10$  mm. K připojení vodičů slouží dva konektory připájené na koncích těchto olověných proužků.

Obě elektrody jsou odděleny separační stěnou o rozměrech  $50 \times 50$  mm. Celá soustava elektrod je umístěna v plastové nádobě o rozměrech  $50 \times 50 \times 50$  mm a naplněna akumulátorovým elektrolytem  $H_2SO_4$  o požadované hustotě. Z důvodu větší stability a zároveň jako ochrana před nechtěným rozlitím elektrolytu byl testovací článek umístěn a přilepen pomocí tavné pistole do plastové misky o rozměrech  $120 \times 80 \times 20$  mm.

Po důkladném zalití soustavy elektrod testovacího článku elektrolytem, poskytnutí dostatku času k nasáknutí elektrolytu do elektrod, naformování článku a nabití, byla změřena kapacita přibližně 0,5 Ah.



**Obr. 8:** Testovací článek

## 7.2 Testovací pracoviště

Základním zařízením k provádění pokusů a testování mého akumulátorového článku je testovací pracoviště na obrázku 9. Jedná se o soustavu čtyř řízených zdrojů AGILENT N6700B. Tyto zdroje jsou napojeny na multifunkční spínací a přepínací zařízení AGILENT 34980A.

Vzájemnou komunikaci a propojení výše uvedených zařízení zprostředkuje počítač s programem AGILENT Vee Pro 8.0.



Obr. 9: Testovací pracoviště

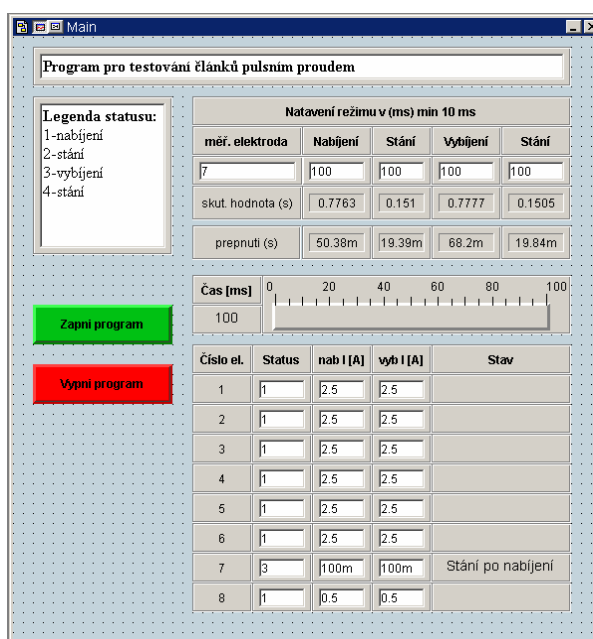
### 7.2.1 Program Agilent Vee Pro 8.0

Agilent Vee Pro 8.0 je grafický program určený k vytváření testovacích a měřicích aplikací. Program Vee Pro nabízí mnoho výhod ve vývoji testování a výrazně zvyšuje produktivitu činností. Aplikace obsahují funkční testování, ověřování správnosti zapojení,

kontrolu a získávání dat. Agilent Vee Pro 8.0 podporuje také spolupráci s programy sady MS Office. Je tedy možné velmi efektivně ukládat naměřené dat z výsledků testů.

Programy v prostředí Vee Pro 8.0 jsou tvořeny pomocí uchopení objektů v menu programu, jejich umístění do aktivního prostředí a vzájemné propojení. Vytvořený diagram je pro uživatele přehlednější a snadněji pochopitelný, než tradiční programování v čistě textové formě.

## 7.2.2 Program pro testování pulzním proudem



Obr. 10: Okno testovacího programu

Za účelem testování pokusného akumulátorového článku byl vytvořen testovací program. Ovládací okno programu znázorňuje obrázek 10. Testovat lze až 8 nezávislých článků. Je možné nezávisle nastavit čas nabíjení, čas stání po nabíjení, čas vybíjení a čas stání po vybíjení. Lze také zvolit nabíjecí a vybíjecí proud a pořadí prováděných akcí. Testování spočívá v generování nabíjecích a vybíjecích proudových pulzů. K vybíjení akumulátorů slouží soustava rezistorů, umístěných po bocích testovacího pracoviště. Kontrolované připojování a odpojování zátěže a nabíjecího zdroje zajišťuje výše přepínací zařízení se soustavou spínacích relátek. Po ukončení každé jednotlivé testovací operace dojde pomocí síťové komunikace mezi počítači k automatickému ukládání naměřených dat do souboru Microsoft Excel na vedlejší počítači. Ukládá se přibližně 100 hodnot za sekundu.

### 7.3 Srovnání napěťových charakteristik v závislosti na délce nabíjecích a vybíjecích pulzů pro různé stavy nabití a různé nabíjecí proudy

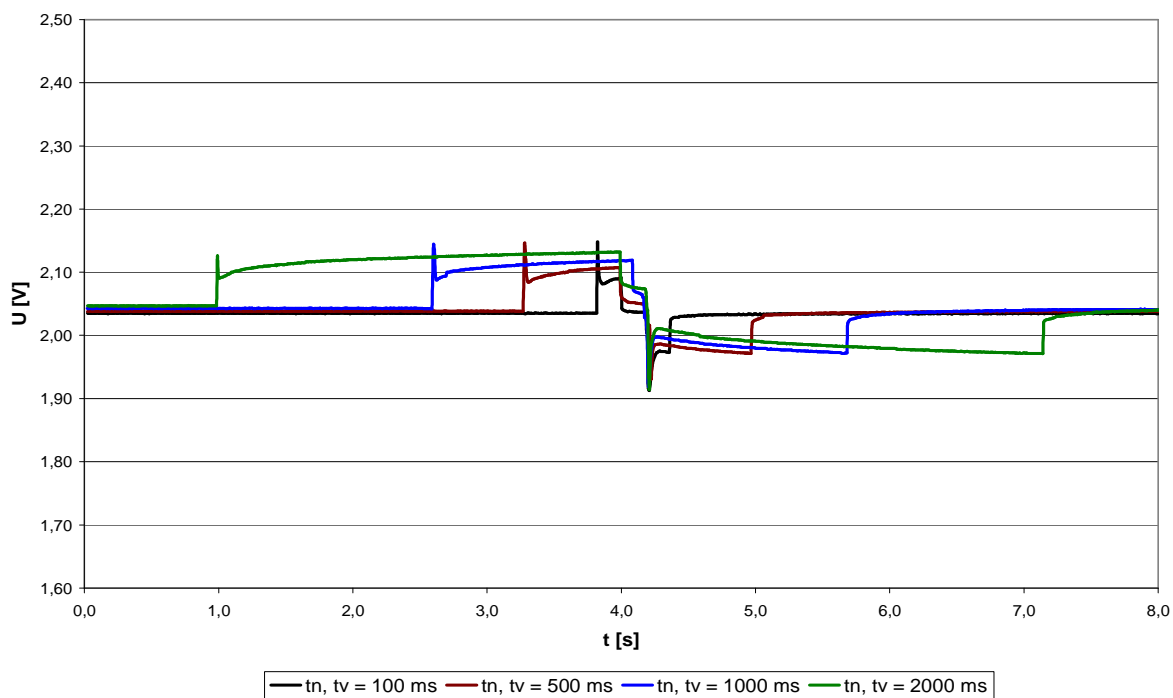
Vyobrazené grafy znázorňují napěťové závislosti pro různé stavy nabití ( $s_n$ ) článku, různé nabíjecí a vybíjecí proudy ( $I_n$ ,  $I_v$ ) a různé délky nabíjecích a vybíjecích pulzů ( $t_n$ ,  $t_v$ ).

Článek byl testován pro stav nabití 0, 25, 75 a 100 %. S ohledem na životnost článku se testovalo nízkými proudy o velikosti 100, 200 a 500 mA. Délka nabíjecího a vybíjecího pulzu byla pro každé jednotlivé měření stejná, aby bylo dosaženo na konci každého měření počátečního stavu nabití článku. Délka pulzů byla 100, 500, 1000 a 2000 ms. Čas stání ( $t_s$ ) mezi nabíjecím a vybíjecím pulzem byl konstantní a jeho hodnota byla 100 ms.

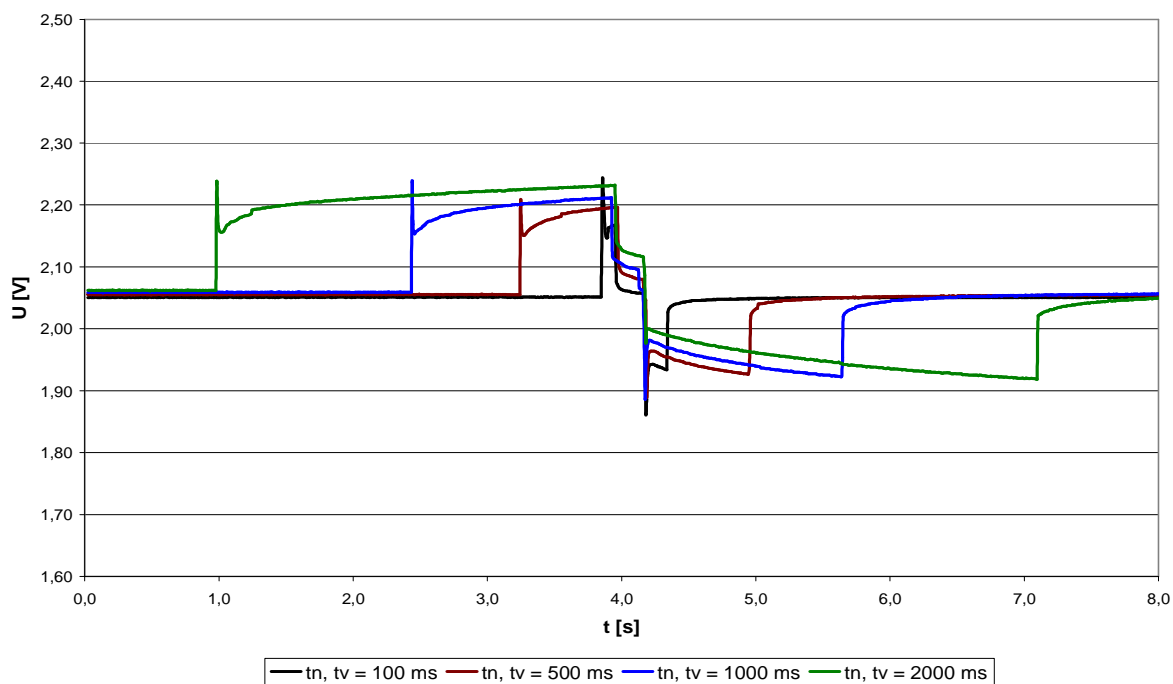
Grafy na obrázcích 11, 12, 13 a 14 znázorňují napěťové průběhy v závislosti na délce pulzu a na protékajícím proudu. Je patrné, že délka pulzů výrazně ovlivňuje napětí na konci nabíjecího i vybíjecího pulzu. Vysvětlení lze vyvodit velmi logicky. Delší nabíjecí pulz má za následek vyšší nárůst napětí článku oproti kratším nabíjecím pulzům. Jako nejvhodnější se ukázala délka pulzu 500 ms. Kratší pulz nezpůsobí výraznou změnu napětí a je tedy nepoužitelný. Delší pulzy lze použít, vzrůstá tím však spotřeba energie a čas testování. Dále je z vyobrazených grafů patrný nárůst napětí se vzrůstajícím nabíjecím proudem. Jedná se o nárůst napětí o 0,1 V při změně nabíjecího proudu ze 100 na 200 mA a nárůst napětí o 0,25 V při změně nabíjecího proudu z 200 na 500 mA. Necháme-li tedy procházet článkem vyšší proud, vzrůstá tím i napětí a dochází k rychlejšímu nabíjení.

Z důvodu detailního prozkoumání chování článku při různých režimech testování byl měněn stav nabití. V uvedených grafech je možné pozorovat napěťovou závislost pulzů na stupni nabití článku. S vyšším stupněm nabití roste i napětí na konci pulzů. Je možné zvolit pořadí pulzů. Na obrázcích 15, 17 a 19 jsou vyobrazeny napěťové průběhy začínající nabíjecím pulzem. Je patrný nárůst napětí na konci pulzu o 0,11 V mezi článkem se stupněm nabití 25 a 75 % a nárůst napětí na konci pulzu o 0,44 V mezi článkem se stupněm nabití 75 a 100 %. Napěťové průběhy začínající vybíjecím pulzem jsou zachyceny na obrázcích 16, 18 a 20. Zde je patrný nárůst napětí na konci pulzu o 0,05 V mezi článkem se stupněm nabití 25 a 75 % a nárůst napětí na konci pulzu o 0,50 V mezi článkem se stupněm nabití 75 a 100 %. U měření, začínajících vybíjecím pulzem, je tedy třeba počítat s nižším napětím na konci pulzu, jelikož vybíjecí pulz způsobí částečné vybití článku.

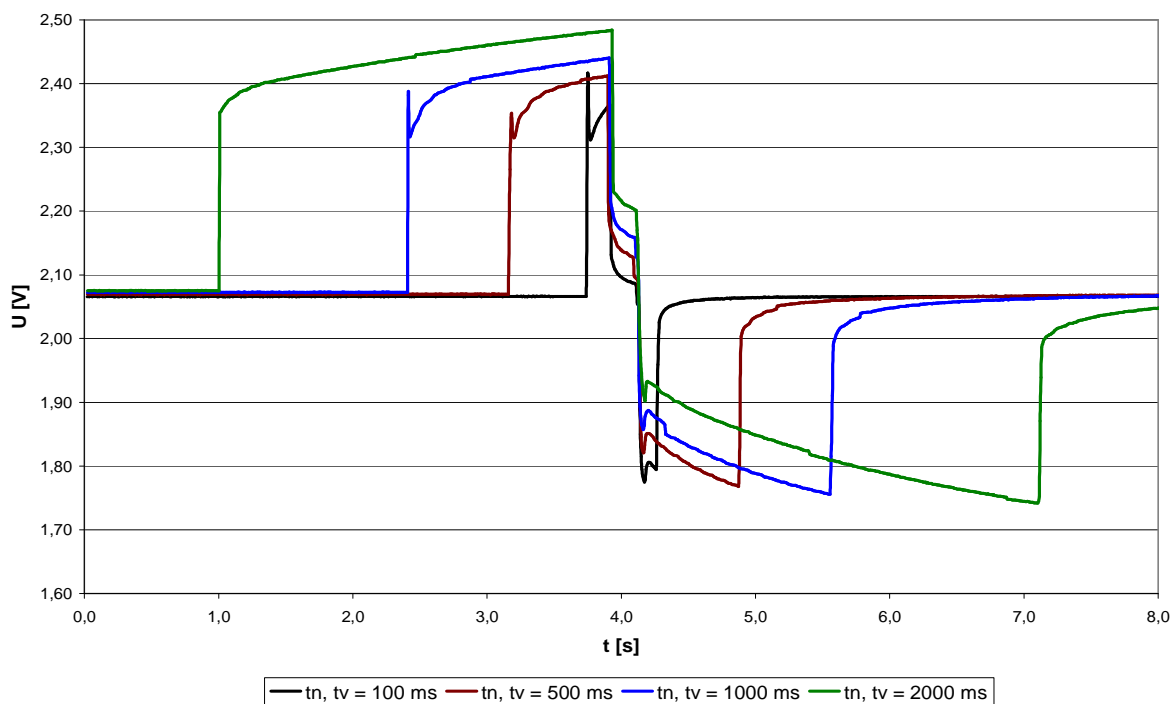
### 7.3.1 Stav nabití 0 %



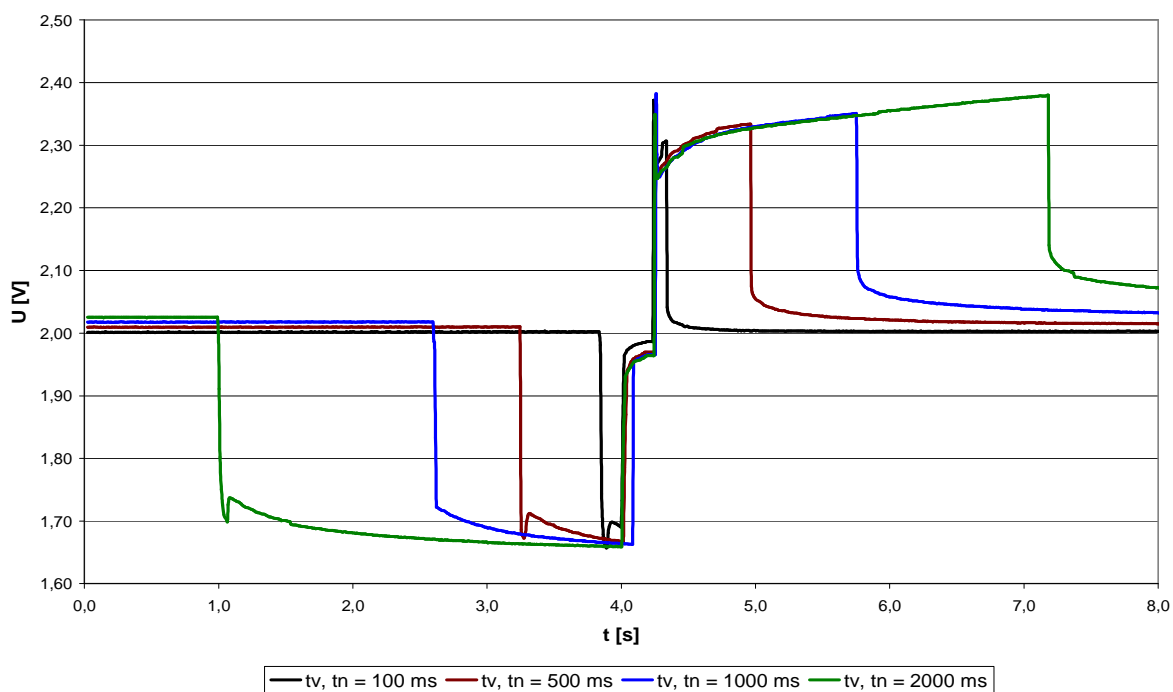
**Obr. 11:** Graf závislosti napětí na délce nabíjecího a vybíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 100$  mA;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 0$  %



**Obr. 12:** Graf závislosti napětí na délce nabíjecího a vybíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 200$  mA;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 0$  %

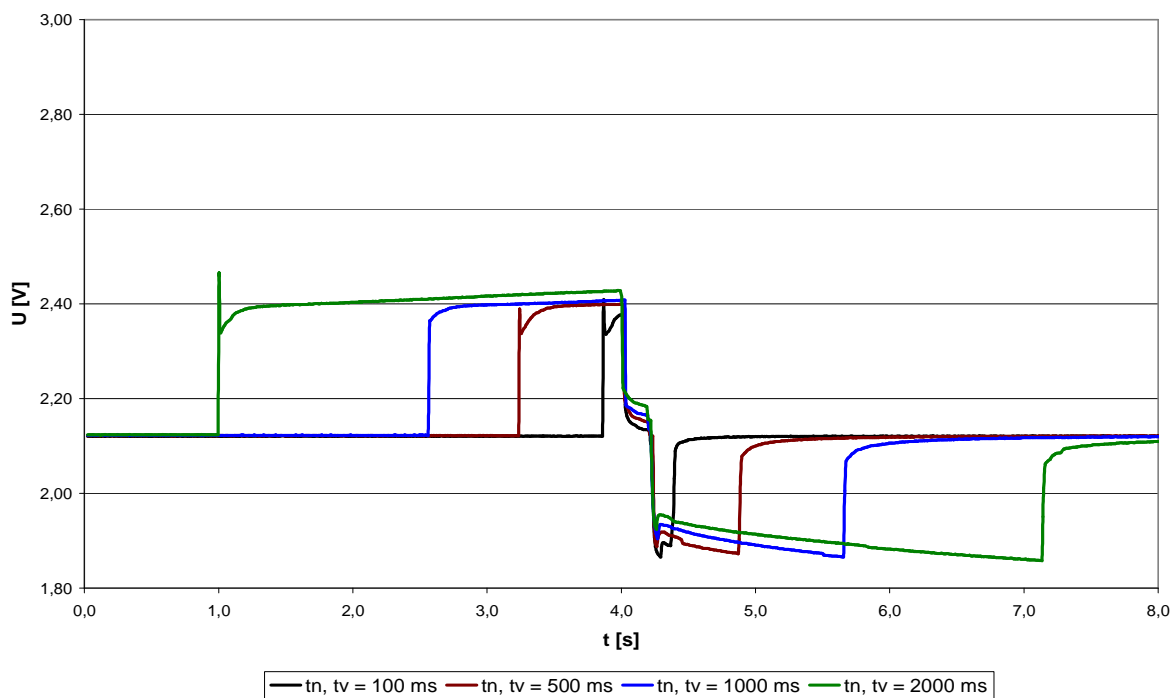


**Obr. 13:** Graf závislosti napětí na délce nabíjecího a vybíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 500$  mA;  
 $t_s = 100$  ms;  $s_n = 0$  %

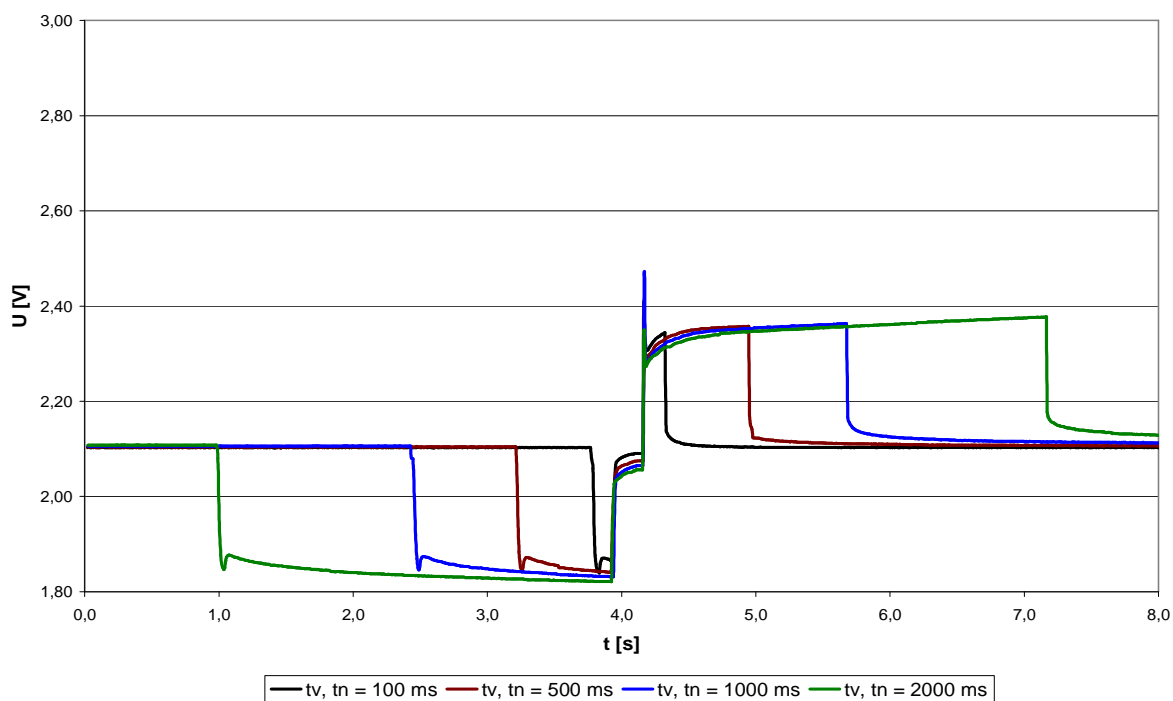


**Obr. 14:** Graf závislosti napětí na délce vybíjecího a nabíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 500$  mA;  
 $t_s = 100$  ms;  $s_n = 0$  %

### 7.3.2 Stav nabití 25 %

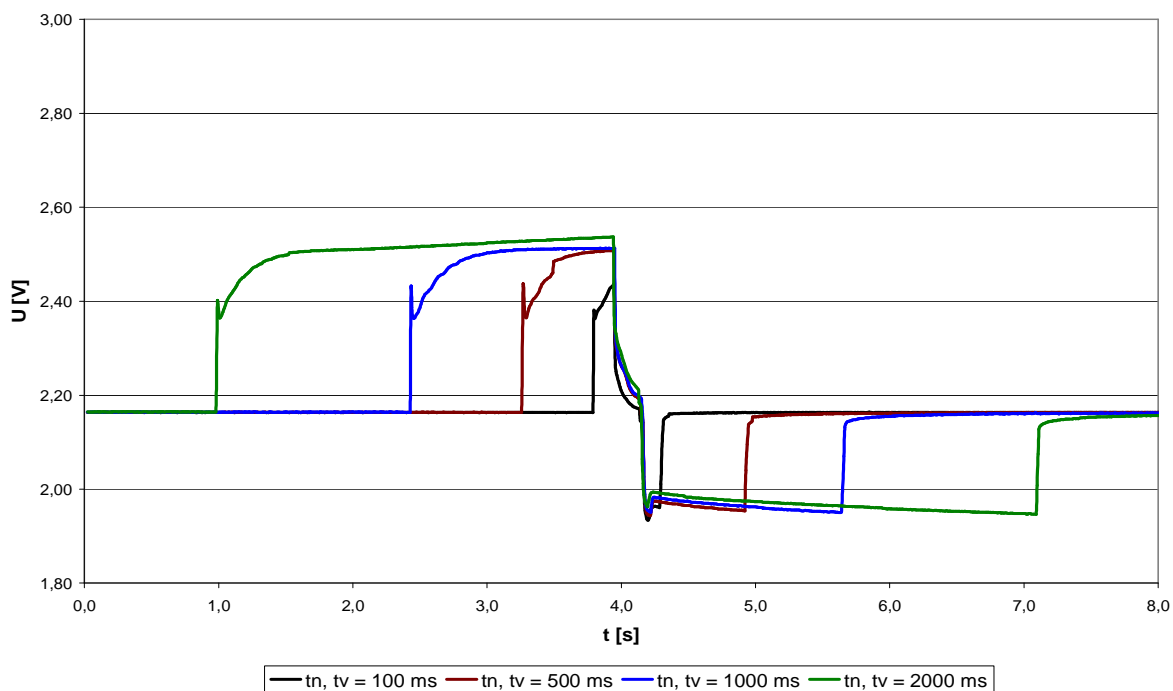


**Obr. 15:** Graf závislosti napětí na délce nabíjecího a vybíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 500$  mA;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 25$  %

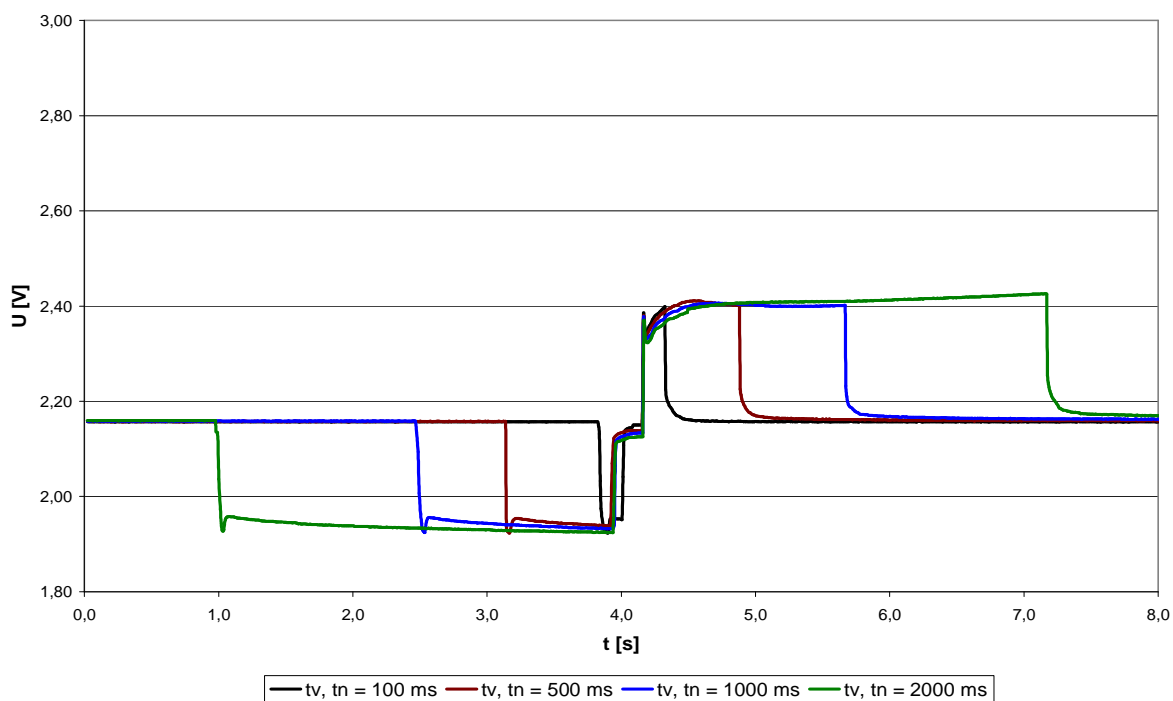


**Obr. 16:** Graf závislosti napětí na délce vybíjecího a nabíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 500$  mA;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 25$  %

### 7.3.3 Stav nabití 75 %

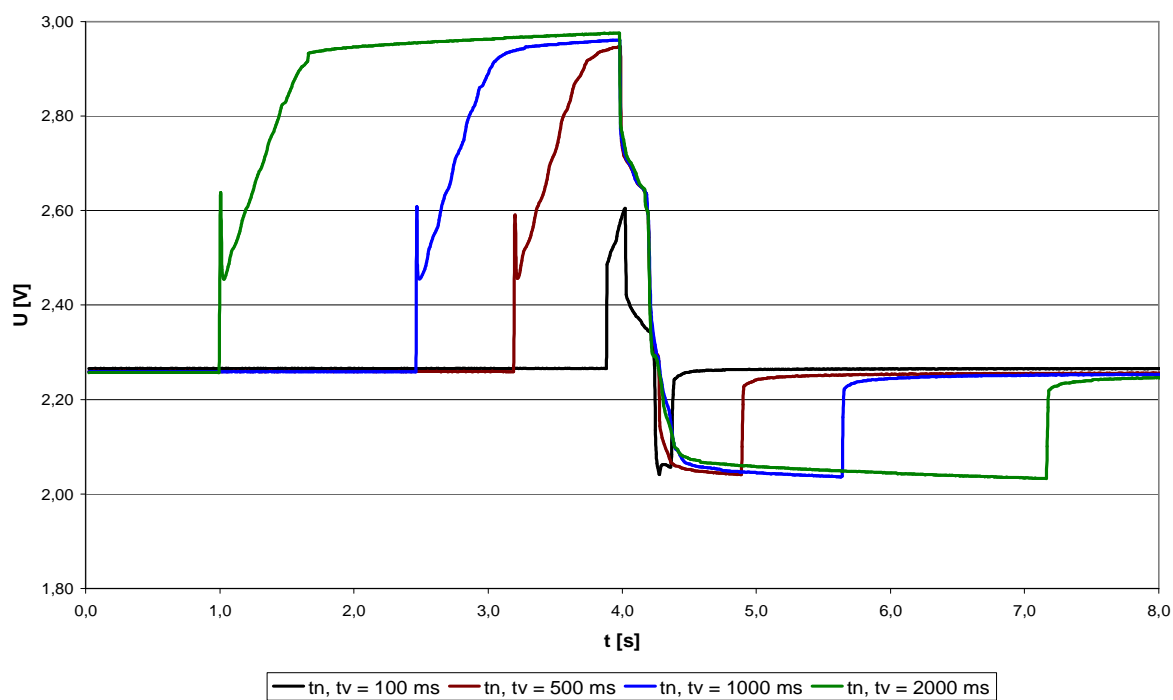


**Obr. 17:** Graf závislosti napětí na délce nabíjecího a vybíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 500 \text{ mA}$ ;  $t_s = 100 \text{ ms}$ ;  $s_n = 75 \%$

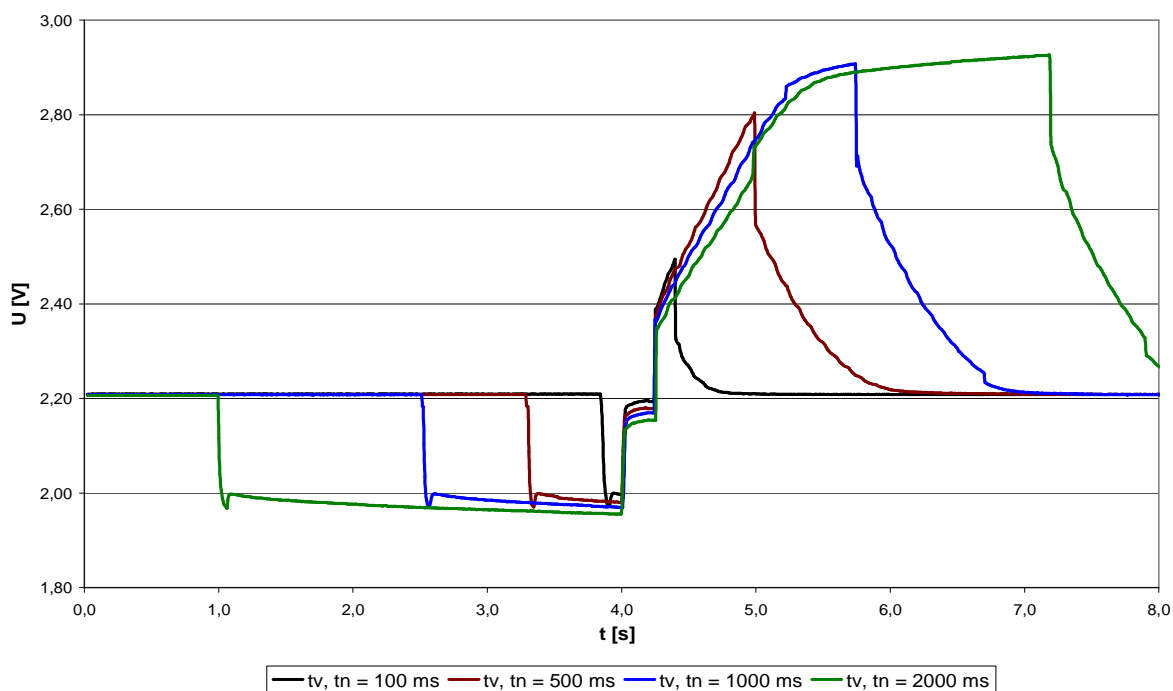


**Obr. 18:** Graf závislosti napětí na délce vybíjecího a nabíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 500 \text{ mA}$ ;  $t_s = 100 \text{ ms}$ ;  $s_n = 75 \%$

### 7.3.4 Stav nabití 100 %



**Obr. 19:** Graf závislosti napětí na délce nabíjecího a vybíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 500$  mA;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 100$  %



**Obr. 20:** Graf závislosti napětí na délce vybíjecího a nabíjecího pulzu pro  $I_n, I_v = 500$  mA;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 100$  %

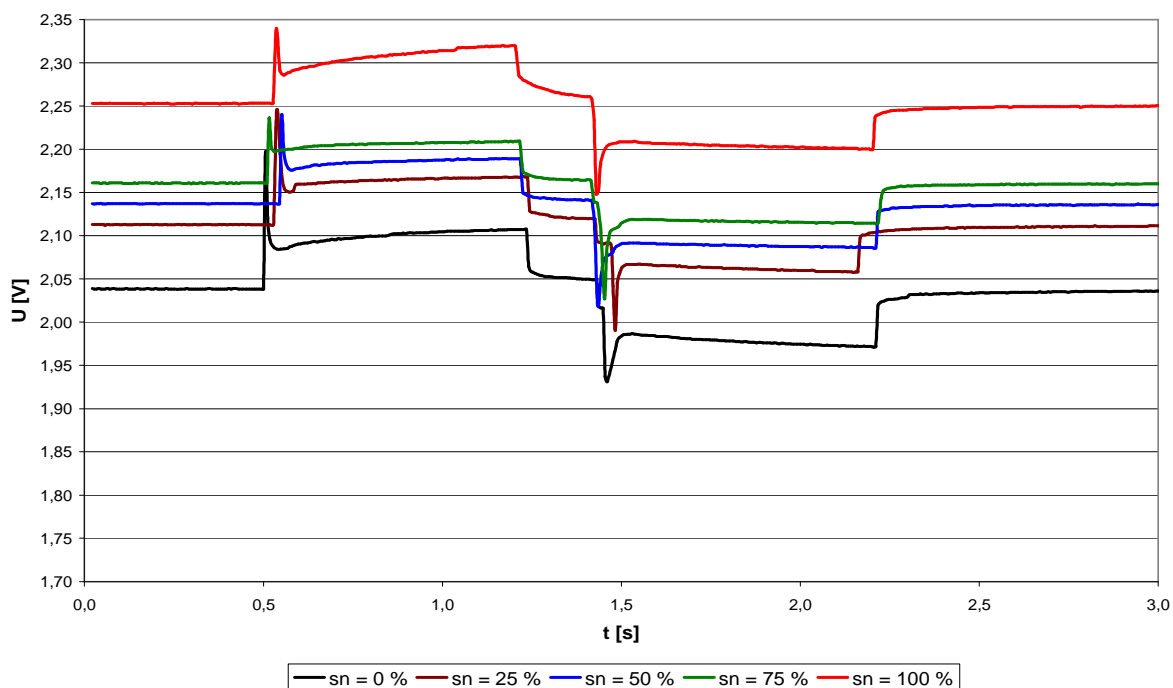
## 7.4 Srovnání napěťových charakteristik pro různé stavy nabití a pro konstantní čas nabíjení a vybíjení 500 ms

Uvedené grafy znázorňují přehledné srovnání závislosti napětí na stupni nabití článku pro 0, 25, 50, 75 a 100 %. Pro testování byl zvolen konstantní nabíjecí a vybíjecí čas 500 ms, který se ve výše uvedeném měření prokázal jako nejvýhodnější. Čas stání byl zvolen 100 ms a testovaný proud 100 mA.

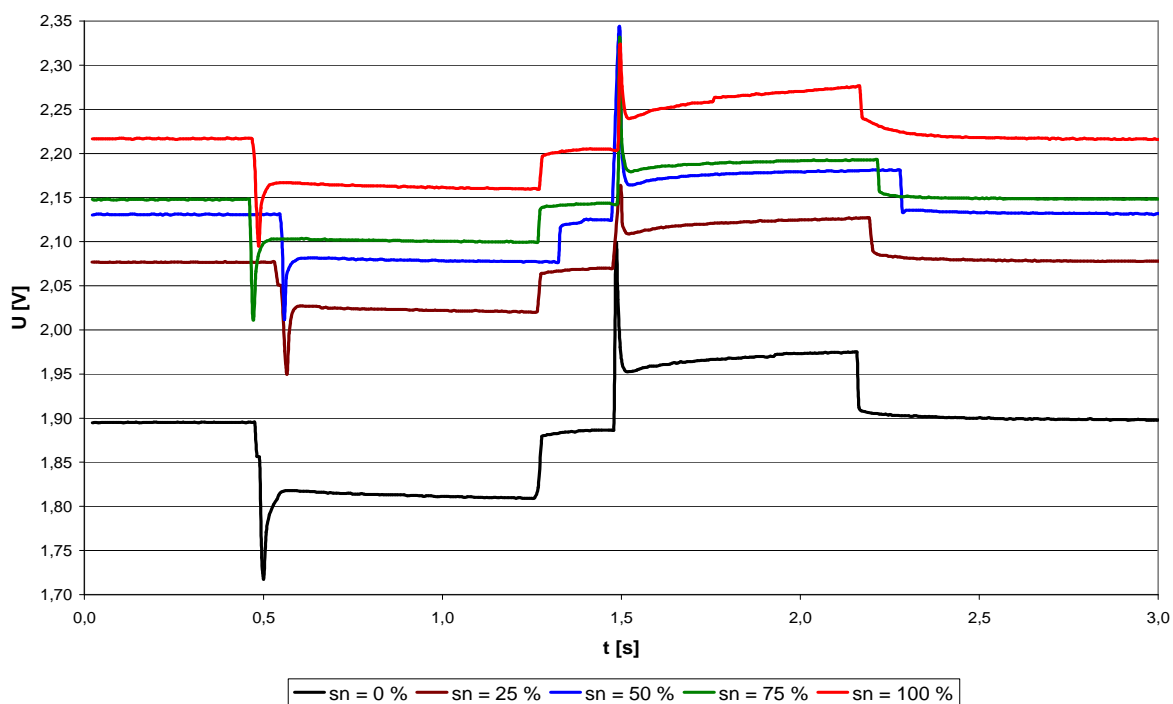
Napěťová závislost začínající nabíjecím pulzem je k posouzení na obrázku 21, kde je vidět nárůst napětí na konci nabíjecího pulzu se zvyšujícím se stavem nabití článku. Je patrný nárůst napětí na konci pulzu o 0,06 V mezi článkem se stupněm nabití 0 a 25 %, o 0,02 V mezi článkem se stupněm nabití 25 a 50 %, o 0,02 V mezi článkem se stupněm nabití 50 a 75 % a nárůst napětí o 0,11 V mezi článkem se stupněm nabití 75 a 100 %.

Vybíjecím pulzem začíná napěťová závislost na obrázku 22, kde je patrný nárůst napětí na konci pulzu o 0,15 V mezi článkem se stupněm nabití 0 a 25 %, o 0,05 V mezi článkem se stupněm nabití 25 a 50 %, o 0,01 V mezi článkem se stupněm nabití 50 a 75 % a nárůst napětí o 0,09 V mezi článkem se stupněm nabití 75 a 100 %.

Předložené napěťové závislosti potvrzují, že s vyšším stupněm nabití vzrůstá i pulzní napětí. Toto zjištění bylo dosaženo v kapitole 7.3.



**Obr. 21:** Graf závislosti napětí na stavu nabití pro  $t_n, t_v = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $I = 100$  mA



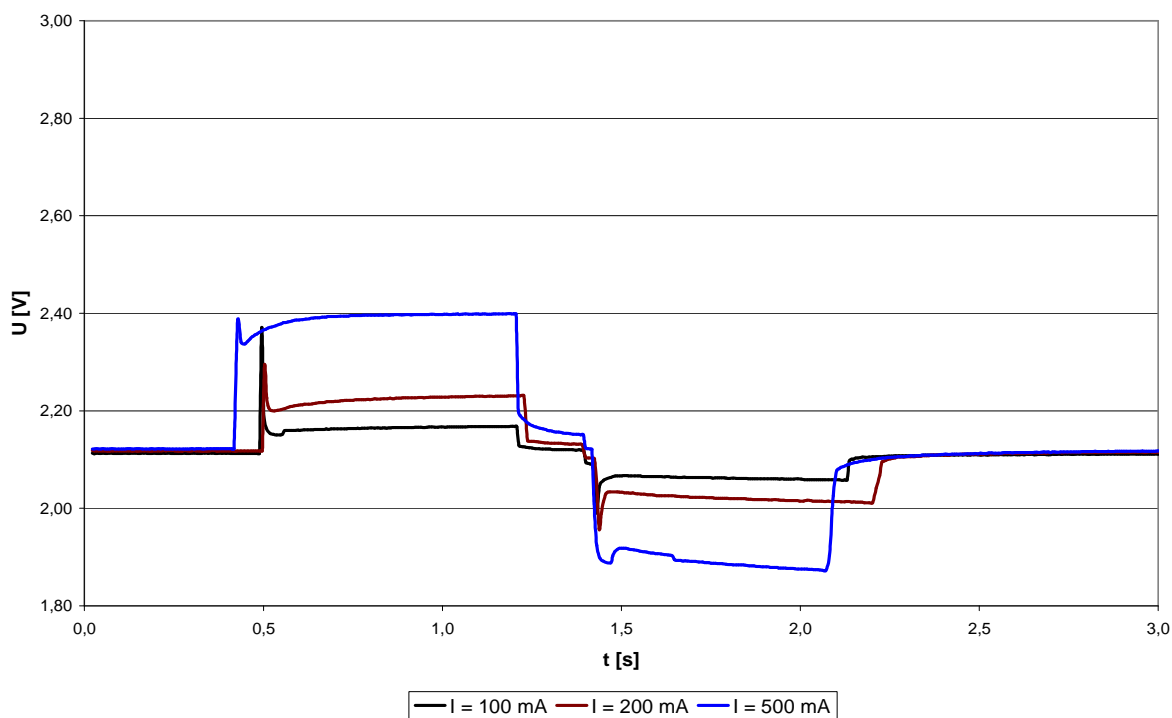
**Obr. 22:** Graf závislosti napětí na stavu nabití pro  $t_v, t_n = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $I = 100$  mA

## 7.5 Srovnání napěťových charakteristik pro různé proudy a pro konstantní čas nabíjení a vybíjení 500 ms

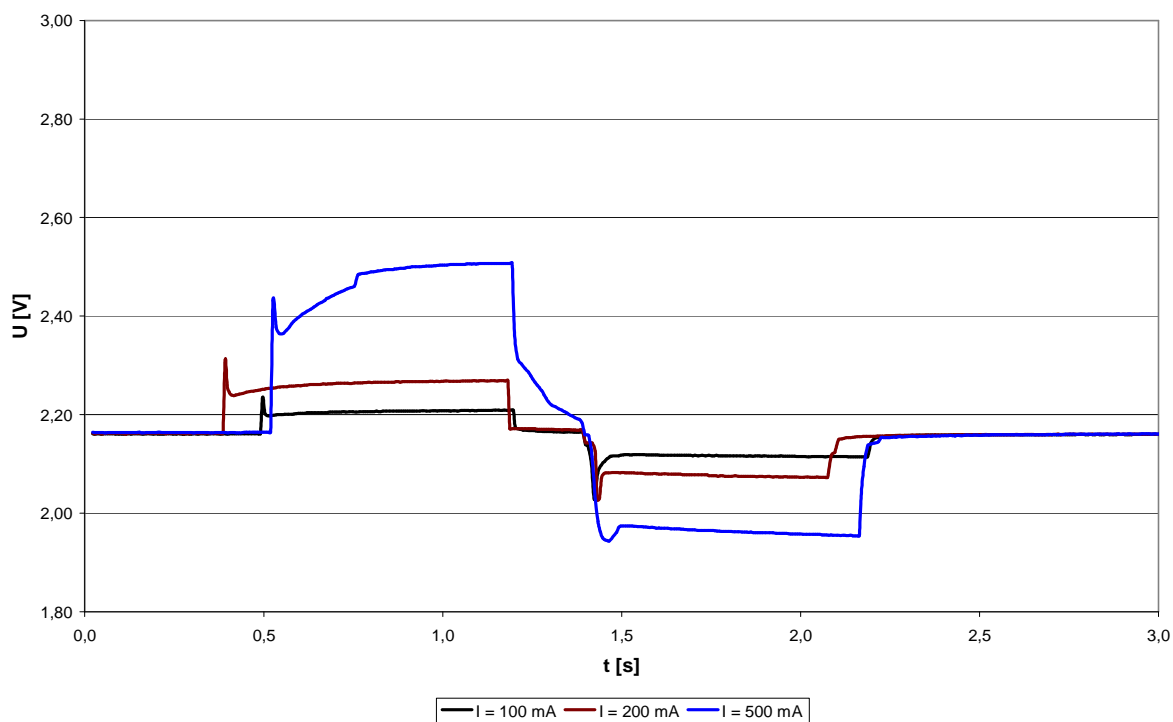
Uvedené grafy pro stupeň nabití článku 25, 75 a 100 % znázorňují závislost napětí na nabíjecím a vybíjecím proudem. Pro testování byl zvolen konstantní nabíjecí a vybíjecí čas 500 ms a čas stání 100 ms. Předložené napěťové závislosti potvrzují výsledky zkoumání, kterých bylo dosaženo v kapitole 7.3, a které dokazují, že velikost procházejícího proudu ovlivňuje nabíjecí a vybíjecí napětí. S rostoucím proudem vzrůstá rozdíl mezi napětím na konci nabíjecího a vybíjecího pulzu. Tento jev vyplývá z Ohmova zákona.

Grafy napěťových závislostí, které začínají nabíjecím pulzem, jsou na obrázcích 23, 24 a 25. Grafy začínající vybíjecím pulzem jsou na obrázcích 26, 27 a 28.

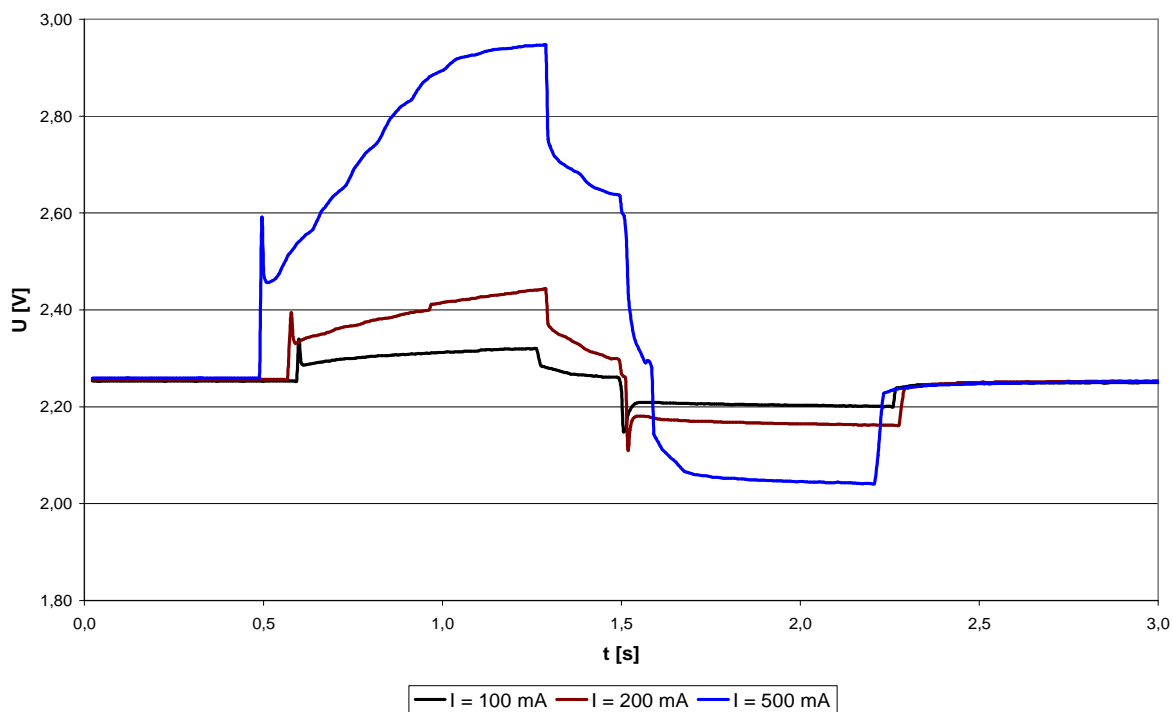
### 7.5.1 Nabíjení, vybíjení



**Obr. 23:** Graf závislosti napětí na proudu pro  $t_n, t_v = 500 \text{ ms}$ ;  $t_s = 100 \text{ ms}$ ;  $s_n = 25 \%$

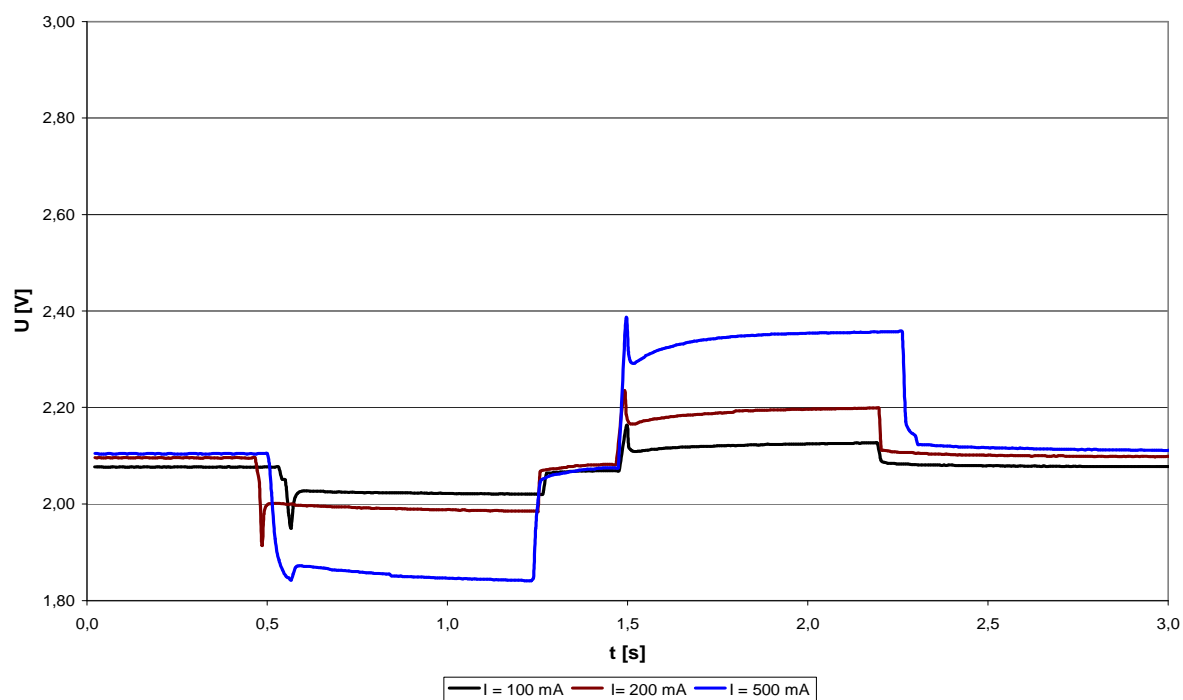


**Obr. 24:** Graf závislosti napětí na proudu pro  $t_n, t_v = 500 \text{ ms}$ ;  $t_s = 100 \text{ ms}$ ;  $s_n = 75 \%$

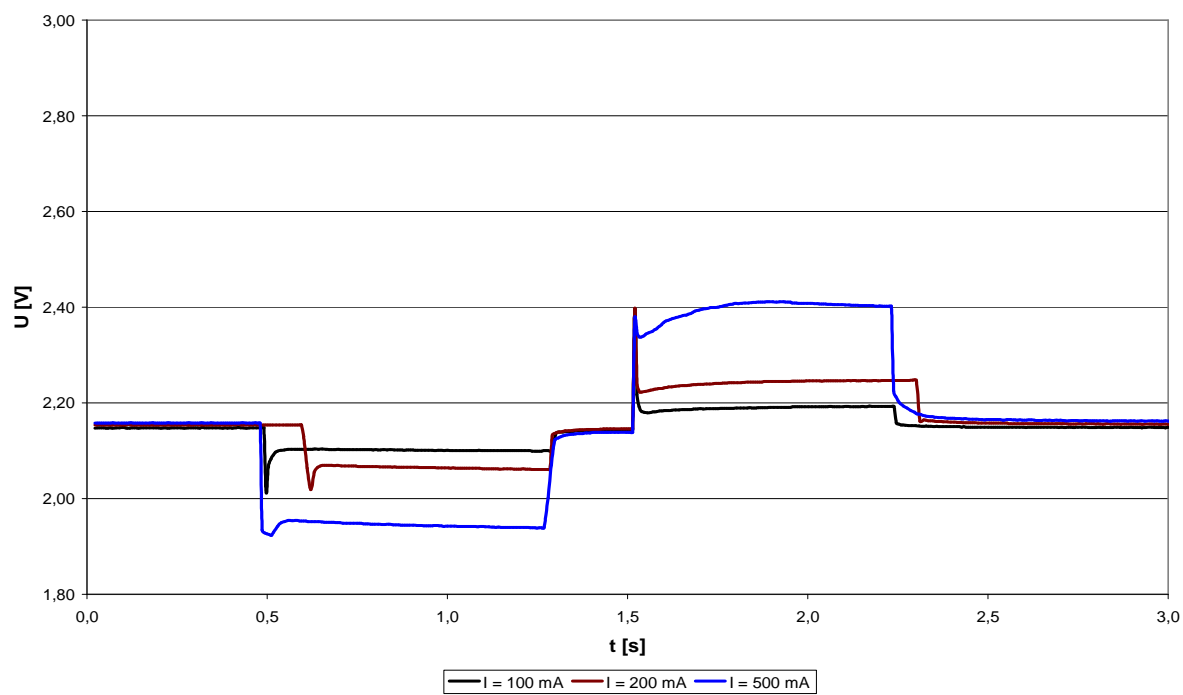


**Obr. 25:** Graf závislosti napětí na proudu pro  $t_n, t_v = 500 \text{ ms}$ ;  $t_s = 100 \text{ ms}$ ;  $s_n = 100 \%$

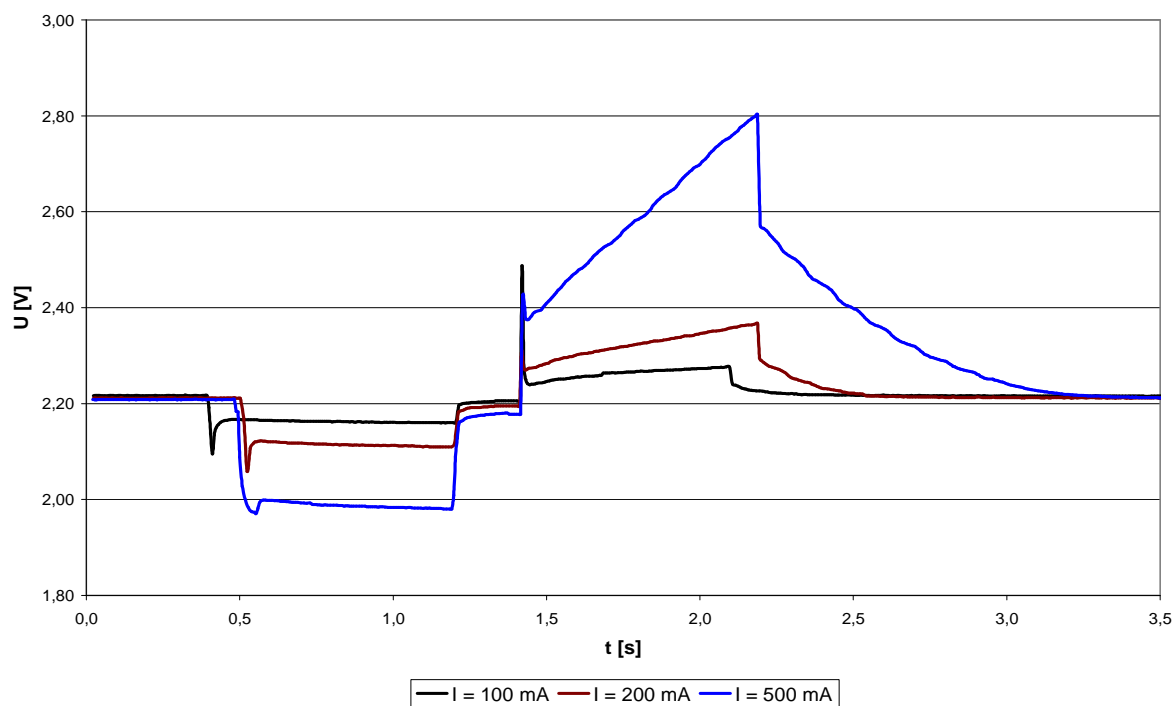
## 7.5.2 Vybíjení, nabíjení



**Obr. 26:** Graf závislosti napětí na proudu pro  $t_v$ ,  $t_n = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 25$  %



**Obr. 27:** Graf závislosti napětí na proudu pro  $t_v$ ,  $t_n = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 75$  %



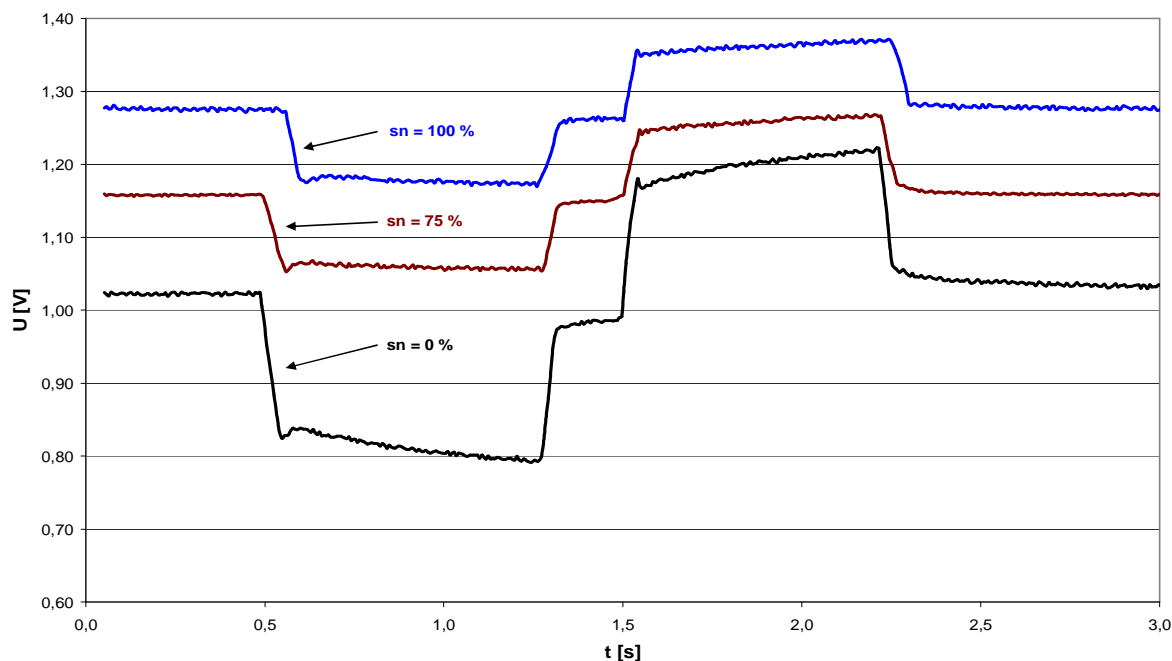
**Obr. 28:** Graf závislosti napětí na proudu pro  $t_v$ ,  $t_n = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $s_n = 100$  %

## 7.6 Srovnání napěťových charakteristik pro kladnou a zápornou elektrodu pro různý stav nabití a pro konstantní čas nabíjení a vybíjení 500 ms

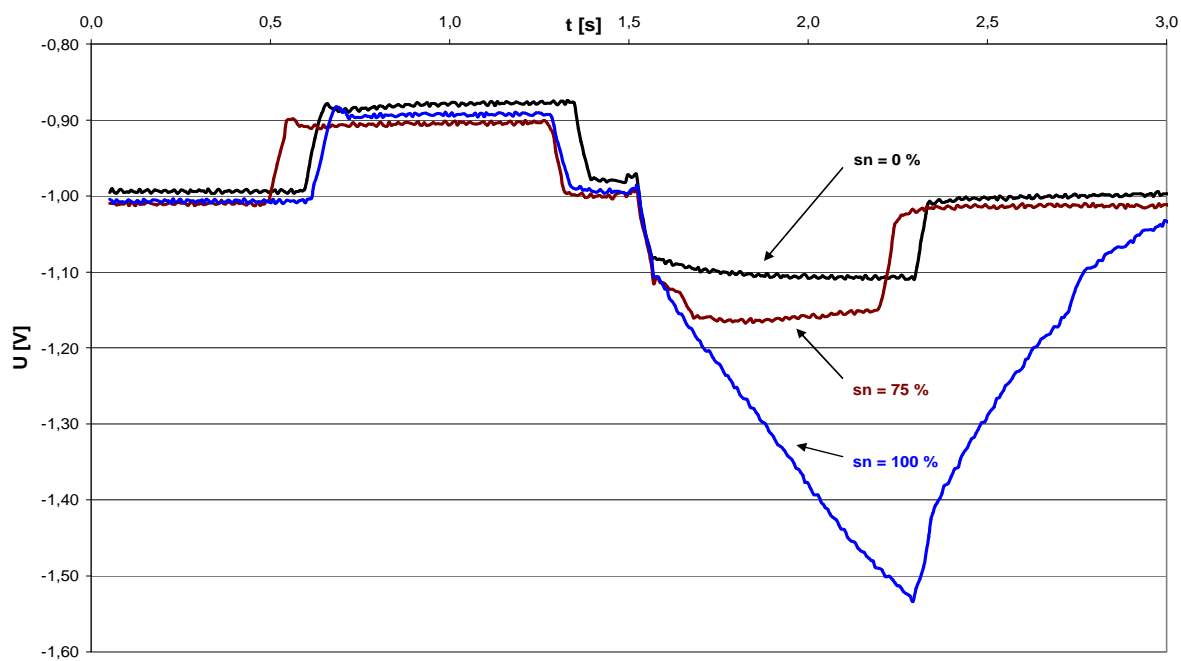
Uvedené obrázky porovnávají napěťové charakteristiky pro kladnou a zápornou elektrodu v závislosti na stupni nabití 0, 75 a 100 %. Pro testování byl zvolen konstantní vybíjecí a nabíjecí čas 500 ms a čas stání 100 ms. Experiment začínal vždy vybíjecím pulzem.

Napěťová charakteristika pro kladnou elektrodu je znázorněna na obrázku 29. Je zde patrný nárůst napětí se vzrůstajícím stupněm nabití. To je způsobeno rostoucí polarizací elektrody. S rostoucím stupněm nabití dochází ke snižování vnitřního odporu, což je nejvíce patrné na zcela vybitém akumulátoru, kde je vnitřní odpor nejvyšší. Vnitřní odpor je úměrný změně napětí článku při přechodu ze stání do nabíjení (vybíjení). Tato změna je nejvyšší při vybitém článku.

Napěťová charakteristika záporné elektrody je znázorněna na obrázku 30. Záporná elektroda má výrazně nižší vnitřní odpor, a to i na konci vybíjení. Nabíjením dochází k polarizaci. Oproti kladné elektrodě není patrný rozdíl ve vnitřním odporu mezi vybitým a nabitým stavem.



**Obr. 29:** Graf závislosti napětí na stavu nabití pro kladnou elektrodu pro  $t_v, t_n = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $I = 500$  mA



**Obr. 30:** Graf závislosti napětí na stavu nabití pro zápornou elektrodu pro  $t_v, t_n = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $I = 500$  mA

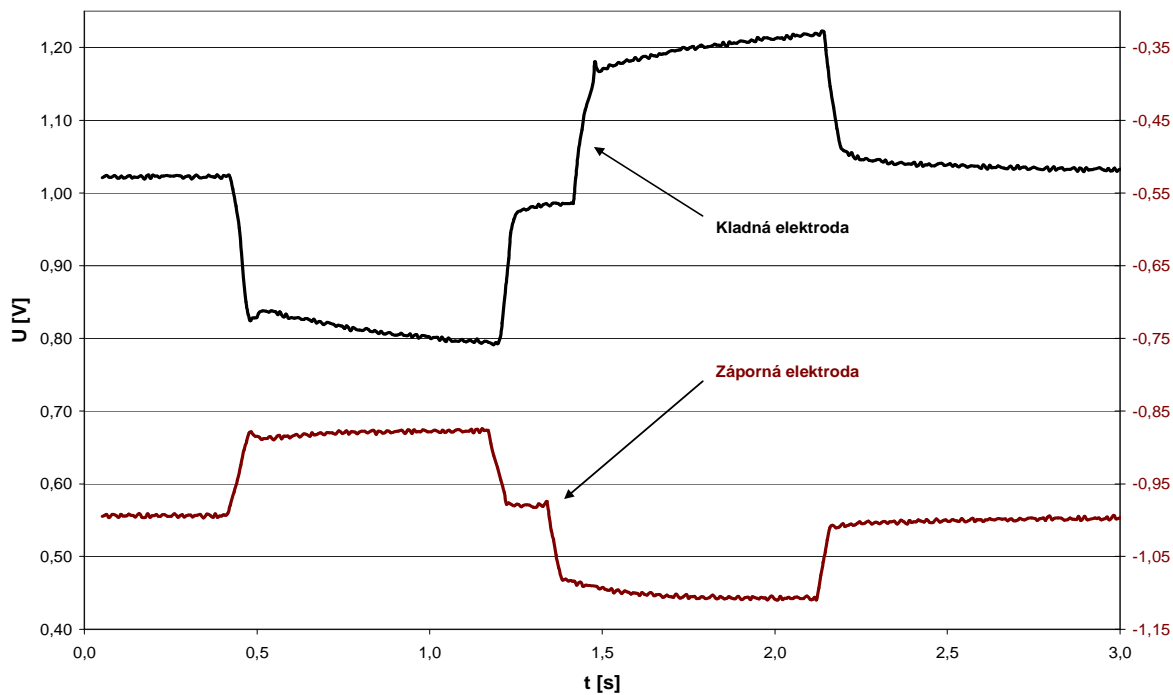
## 7.7 Srovnání napěťových charakteristik kladné a záporné elektrody pro konstantní čas nabíjení a vybíjení 500 ms

Znázorněné grafy porovnávají napěťové charakteristiky kladné a záporné elektrody pro stupně nabití 0 a 100 %. Pro testování byl zvolen konstantní vybíjecí a nabíjecí čas 500 ms a čas stání 100 ms. Experiment začínal vždy vybíjecím pulzem.

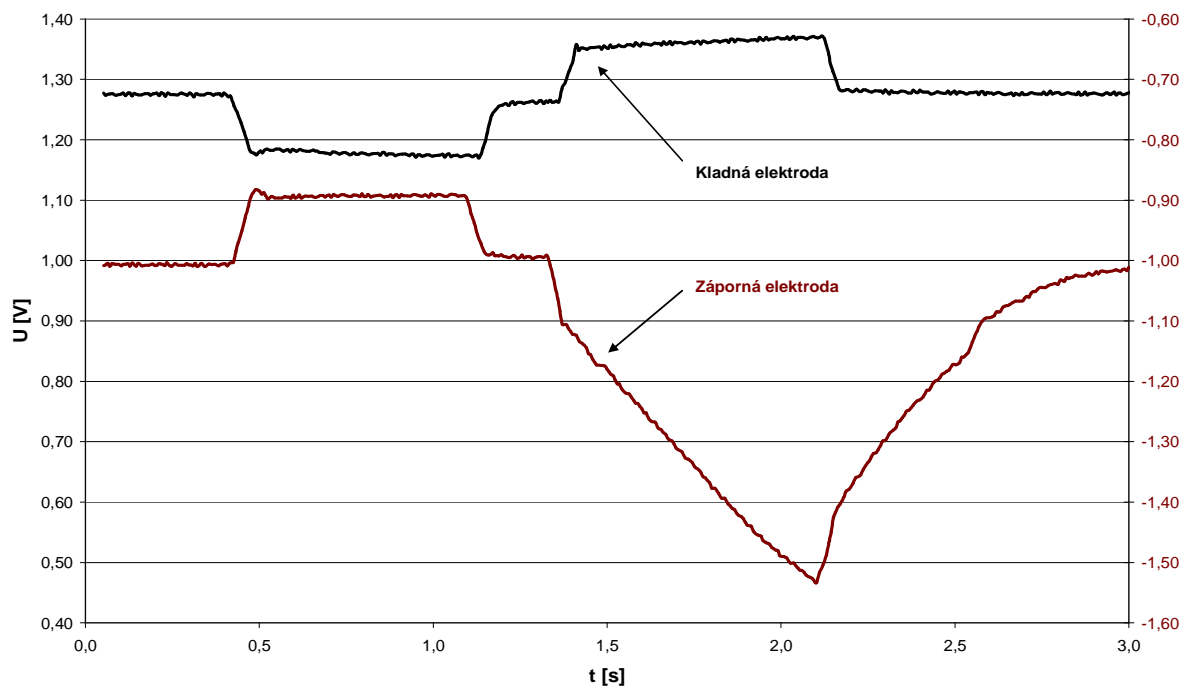
Obrázek 31 znázorňuje napěťovou závislost kladné a záporné elektrody při zcela vybitém článku. Je patrné, že změna potenciálu na kladné elektrodě je během vybíjecího pulzu větší, než u záporné elektrody. Pokles napětí na kladné elektrodě je výrazně prudší, než na záporné elektrodě. Lze konstatovat, že kladná elektroda je limitující, protože se během vybíjecího pulzu rychleji vybíjí.

Napěťová závislost kladné a záporné elektrody při zcela nabitém článku je zachycena na obrázku 32. Z obrázku je patrné, že záporná elektroda je již nabitá (v nabíjecím pulzu se prudce mění potenciál o 0,42 V). Kladná elektroda ještě není plně nabitá (změna potenciálu v nabíjecím pulzu 0,1 V). Příčinu lze vyvodit z toho, že záporná elektroda se při vybíjení článku nevybila plně a uchovala si část své kapacity, proto se při nabíjení dříve nabíla.

Metodou proudových pulzů lze zjistit, která elektroda je limitující, a to zejména v případě, že je článek plně vybitý. Lze také zjistit, která elektroda je plně nabitá a která ještě není plně nabitá, a to v případě, že je článek plně nabitý.



**Obr. 31:** Graf napětí na kladné a záporné elektrodě pro  $t_v, t_n = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $I = 500$  mA;  $s_n = 0$  %



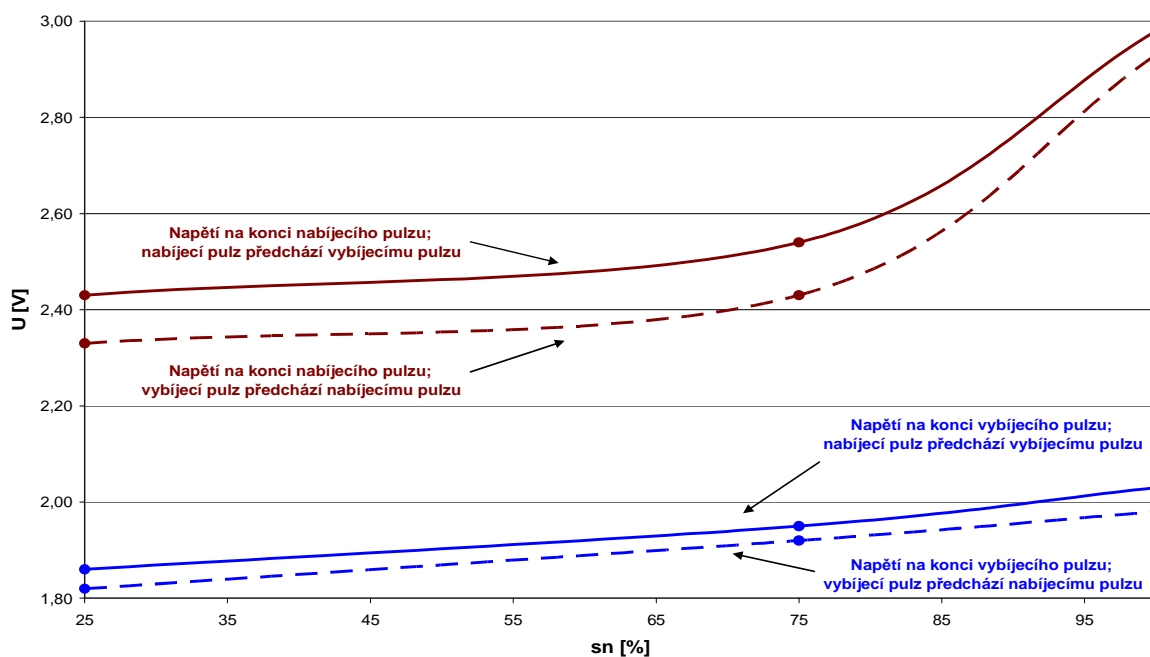
**Obr. 32:** Graf napětí na kladné a záporné elektrodě pro  $t_v, t_n = 500$  ms;  $t_s = 100$  ms;  $I = 500$  mA;  $s_n = 100$  %

## 7.8 Odhad stavu nabití článku

Z hodnot získaných během testování článku v kapitole 7.3, byl vytvořen srovnávací graf, který je zobrazen na obrázku 33. Byly použity hodnoty pro stav nabití 25, 75 a 100 %. Délka nabíjecího a vybíjecího pulzu byla zvolena 2000 ms a testovaný proud 500 mA. Pořadí pulzů bylo měněno.

Vyobrazené křivky porovnávají napětí na konci nabíjecího (vybíjecího) pulzu, a to v případě, kdy nabíjecí pulz předchází vybíjecímu pulzu a naopak. Z grafu je patrný nárůst napětí se zvyšujícím se stavem nabití. U měření, začínajících nabíjecím pulzem, jsou napěťové křivky zřetelně posunuty do vyšších hodnot potenciálu. Tento jev byl již odůvodněn v předchozích kapitolách. Tvary napěťových závislostí nabíjecích pulzů jsou velice podobné, lze tedy pro odhad stavu nabití akumulátoru použít obě varianty. Totéž platí i pro napěťové závislosti vybíjecích pulzů.

Pro přesné určení stavu nabití akumulátoru je třeba stanovit a dodržet pořadí pulzu, velikost proudu a délku pulzu. Jelikož různé typy akumulátorů mají rozdílné vlastnosti, je nutné provést zkušební měření pro každý typ a vytvořit srovnávací tabulku hodnot napětí v závislosti na stavu nabití. Podle této tabulky pak bude možno určit stav nabití akumulátoru.



Obr. 33: Srovnávací graf pro určení stavu nabití článku

## 8 Závěr

Při zpracování diplomové práce jsem se hlouběji seznámil s principy a funkcí akumulace elektrické energie, a to zejména s funkcí olověných akumulátorů. Vyzkoušel jsem si také výrobu vlastního pokusného akumulátorového článku, stejně jako základy práce s programem VEE Pro 8.0. V rámci výzkumu byl také vytvořen program, umožňující aplikaci proudových pulzů a kontinuální záznam napětí olověného akumulátoru.

Mým úkolem bylo prozkoumat možnosti predikce stavu nabití olověných akumulátorů pomocí metody proudových pulzů a stanovit vhodnost této metody při použití v praxi. Za tímto účelem jsem použil několik metod zkoumání.

Zkušební článek jsem testoval pro stav nabití 0, 25, 75 a 100 % při délce pulzů 100, 500, 1000 a 2000 ms a konstantním času stání 100 ms. Z důvodu vyšší životnosti článku a s ohledem na možnosti testovacího zařízení jsem použil nízké proudy 100, 200 a 500 mA. Délku nabíjecích a vybíjecích pulzů jsem zvolil pro každé jednotlivé měření stejnou, aby bylo dosaženo na konci každého měření počátečního stavu nabití článku.

Podstata výzkumu spočívala v měření, záznamu a porovnání napěťových průběhů v závislosti na délce nabíjecího a vybíjecího pulzu, na protékajícím proudu, na pořadí pulzů a na stavu nabití článku. Zjistil jsem, že délka pulzů výrazně ovlivnila napětí na konci nabíjecího i vybíjecího pulzu. Delší nabíjecí pulz způsobil vyšší nárůst napětí oproti kratším nabíjecím pulzům. Delší vybíjecí pulz způsobil vyšší pokles napětí oproti kratším vybíjecím pulzům. Jako nejvhodnější se projevila délka pulzu 500 ms. Při zkoumání napěťové závislosti na protékajícím proudu jsem si ověřil teorii Ohmova zákona. S rostoucím proudem vzrůstal rozdíl mezi napětím na konci nabíjecího a vybíjecího pulzu.

Z důvodu průzkumu chování článku při různých režimech testování jsem měnil stav nabití a současně pořadí pulzů. S vyšším stupněm nabití vzrůstalo i napětí na konci pulzů. Měření, začínající vybíjecím pulzem, se projevilo nižším napětím na konci pulzu, jelikož vybíjecí pulz způsobil částečné vybití článku.

V další části výzkumu jsem porovnával napěťové charakteristiky pro kladnou a zápornou elektrodu v závislosti na stupni nabití. U kladné elektrody byl patrný nárůst napětí se vzrůstajícím stupněm nabití, což způsobila zvyšující se polarizace elektrody. Vnitřní odpor byl úměrný změně napětí článku při přechodu ze stání do nabíjení (vybíjení), což se nejvíce

projevilo při vybitém článku. Záporná elektroda měla výrazně nižší vnitřní odpor, a to i na konci vybíjení. V porovnání s kladnou elektrodou nebyl patrný rozdíl ve vnitřním odporu mezi vybitým a nabitým stavem. Změna potenciálu na kladné elektrodě byla během vybíjecího pulzu větší, než u záporné elektrody a pokles napětí na kladné elektrodě byl výrazně prudší, než na záporné elektrodě. Zjistil jsem, že kladná elektroda je limitující, protože se během vybíjecího pulzu rychleji vybíjí.

Po celkovém zhodnocení výzkumu lze konstatovat, že metoda proudových pulzů je vhodná a použitelná pro určení stavu nabití olověného akumulátoru. Je však nutné stanovit a dodržet pořadí pulzů, velikost proudu a délku pulzů. Jelikož různé typy akumulátorů mají rozdílné vlastnosti, je třeba provést zkušební měření pro každý typ a vytvořit srovnávací tabulku hodnot napětí v závislosti na stavu nabití. Podle této tabulky pak bude možno určit stav nabití akumulátoru.

Metodou proudových pulzů je také možné zjistit, která elektroda je limitující, a to zejména v případě, že je článek plně vybitý. Lze také zjistit, která elektroda je plně nabitá a která ještě není plně nabitá, pokud se jedná o plně nabitý článek.

Během testování docházelo k nepatrným odchylkám měření, a to zejména v délkách pulzů a délce času stání. To mohlo být způsobeno nedokonalostí přepínacích karet, nebo automatickým spouštěním parazitních programů v počítači, které mohly zpomalit chod měřicího programu.

## 9 Seznam použité literatury

- [1] CENEK, Miroslav, et al. *Akumulátory od principu k praxi*. Vyd. 1. Praha : FCC PUBLIC, 2003. 148 s. ISBN 80-86534-03-0.
- [2] LÁBUS, Radek. *Automatizované měřicí pracoviště pro výzkum experimentálních článků olověných akumulátorů*. Brno, 2006. 51 s. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [3] HAMMERBAUER, Jiří. *Olověné akumulátory*. [online]. 2007 [cit. 2010-4-17], Dostupný z WWW: <http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/clanky2/olov.pdf>.
- [4] VANĚK, Jiří; KŘIVÍK, Petr; NOVÁK, Vítězslav. *Alternativní zdroje energie* [online]. 2006. Brno : VUT Brno, 2006 [cit. 2010-05-02]. Dostupné z WWW: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=27102](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=27102)>.
- [5] *The battery clinic* [online]. 2002 [cit. 2010-05-22]. The Process of making a Restored Battery. Dostupné z WWW: <[www.thebatteryclinic.co.nz/BatteriesMaking.html](http://www.thebatteryclinic.co.nz/BatteriesMaking.html)>.
- [6] *Varta.cz* [online]. 2008 [cit. 2010-05-22]. Varta. Dostupné z WWW: <[www.varta.cz](http://www.varta.cz)>.
- [7] *Elektromobily TOYOTA* [online]. 2005 [cit. 2010-05-22]. TOYOTA. Dostupné z WWW: <[www.electroauto.cz/toyota.html](http://www.electroauto.cz/toyota.html)>.
- [8] *EnerSys* [online]. 2005, 2010 [cit. 2010-05-22]. Powersafe. Dostupné z WWW: <[www.enersysreservepower.com](http://www.enersysreservepower.com)>.
- [9] *Braunstar* [online]. 1990, 2010 [cit. 2010-05-22]. Braunstar. Dostupné z WWW: <[www.braunstar.cz/rybar/www/uvod.htm](http://www.braunstar.cz/rybar/www/uvod.htm)>.
- [10] KŘIVÍK, Petr : Predikce stavu nabití (SOC) olověných akumulátorů. In *Grantová agentura České republiky - část C*. [s.l.] : [s.n.], 2008. s. 3.