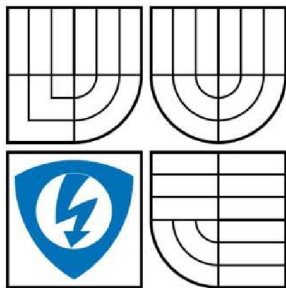


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

# OPTIMALIZÁCIA A METÓDY MERANIA VNÚTORNÉHO ODPORU ČLÁNKU OLOVENÉHO AKUMULÁTORU

Optimalization and methods of internal resistance measurement of the lead adic battery cell

DIPLOMOVÁ PRÁCA

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

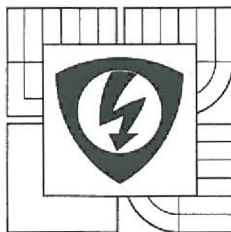
AUTHOR

Bc. Branislav Fojtlín

VEDÚCI PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Křivík, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektrotechnická výroba a management

**Student:** Bc. Branislav Fojtlín

**Ročník:** 2

**ID:** 73045

**Akademický rok:** 2012/13

**NÁZEV TÉMATU:**

## Optimalizace a metody měření vnitřního odporu článku olověného akumulátoru

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte literaturu a seznamte se s problematikou olověných akumulátorů se zaměřením na způsoby a metody měření jejich vnitřního odporu. Vytvořte zařízení pro měření vnitřního odporu. Na pokusném článku ověřte funkčnost zařízení pro měření vnitřního odporu článku olověného akumulátoru. Optimalizujte metodu měření vnitřního odporu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 30.5.2013

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

**Konzultanti diplomové práce:**

**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.

## **Anotácia**

Témou diplomovej práce je optimalizácia a metódy merania vnútorného odporu oloveného akumulátoru. Práca sa najprv zameriava na delenie, rozbor vlastností olovených akumulátorov, konštrukciu a negatívne javy. Následne je spracovaná metóda merania vnútorného odporu experimentálneho článku s praktickým návrhom meracieho pracoviska. V práci sa vykonáva frekvenčná analýza impedancie nabitého a vybitého článku. Následne sú spracované grafické znázornenia vnútorného odporu pre rôzne veľkosti amplitúd, pre rôzne druhy signálov a rôzne veľkosti frekvencií striedavého prúdu. Výsledkom práce je porovnanie jednotlivých grafických závislostí vybíjajúcich a nabíjajúcich charakteristík článku a stanovenie optimálnej amplitúdy, tvaru a veľkosti frekvencie striedavého prúdu, kedy je vnútorný odpor vyhodnocovaný správne.

## **Annotation**

The aim of this master's thesis is optimization and methods of measuring the internal resistance of lead acid accumulator. First focus is on the analysis of properties of lead acid accumulators, their construction and negative effects. After that a method of measuring the internal resistance of experimental accumulator is processed. In this thesis practical design of measuring workplace is completed. The frequency analysis of impedance of charging and discharging accumulator is performed. After that the graph of internal resistance for various amplitude intensities, for various signal forms and also for various size of frequencies of alternating current are processed. The result of this thesis is a comparison of graphic works additions charging and discharging characteristics of lead acid accumulator and determination of optimal amplitude, form and intensity of frequency of alternating current in point when internal resistance is evaluated correctly.

## **Klíčové slová**

olovený akumulátor, meranie vnútorného odporu, experimentálny článok, automatizované meracie pracovisko

## **Keywords**

lead-acid accumulator, measuring the internal resistance, experimental battery cell, automatized measuring apparatus

FOJTLÍN, B. *Optimalizácia a metódy merania vnútorného odporu oloveného akumulátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2013. 59 s. Diplomová práce. Vedúci diplomovej práce Ing. PetrKřivík, Ph.D.



## **PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému OPTIMALIZÁCIA A METÓDY MERANIA VNÚTORNÉHO ODPORU OLOVENÉHO AKUMULÁTORU som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb, v prvom rade som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa .....

.....

(podpis autora)

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za trpezlivosť a účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>vii</b>
<b>Zoznam tabuliek</b>	<b>ix</b>
<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Delenie elektrochemických článkov</b>	<b>11</b>
1.1 Primárne články .....	11
1.2 Sekundárne články .....	11
1.3 Podľa spôsobu aplikácie .....	11
1.4 Podľa stavu pri dodaní .....	12
1.5 Podľa elektrolytu .....	12
<b>2 Olovené akumulátory</b>	<b>13</b>
2.1 Charakteristika [1] [3] [4] .....	13
2.2 Konštrukcia olovených akumulátorov [3] [5].....	16
2.2.1 Nádoba akumulátora .....	16
2.2.2 Veko akumulátora .....	17
2.2.3 Separátory .....	17
2.2.4 Články .....	17
2.2.5 Článkové a spojovacie mostíky .....	18
2.2.6 Zátky článkov .....	19
2.2.7 Pólové vývody .....	19
2.2.8 Svorky pre pripojenie vodičov .....	20
2.2.9 Elektrolyt .....	20
2.2.10 Indikátor hustoty elektrolytu.....	20
<b>3 Formovanie elektród</b>	<b>21</b>
<b>4 Hĺbka vybitia a vybíjací prúd</b>	<b>21</b>
<b>5 Negatívne javy olovených akumulátorov [7]</b>	<b>22</b>
5.1 Samovybíjanie .....	22
5.2 Skraty .....	22
5.3 Sulfatácia .....	23
5.4 Vrstvenie elektrolytu.....	24

<b>6</b>	<b>Meranie článkov akumulátorov</b>	<b>24</b>
6.1	Meranie vnútorného odporu akumulátora [5] .....	24
6.2	Meranie vnútorného odporu článku striedavou metódou .....	26
<b>7</b>	<b>Praktická časť</b>	<b>26</b>
7.1	NF zosilňovač signálu.....	26
7.2	Zapojenie pracoviska .....	27
7.3	Článok.....	30
7.4	Obslužný software pre cyklovanie článkov .....	30
7.5	Grafické priebehy striedavého prúdu používané pre meranie vnútorného odporu.....	31
7.6	Frekvenčná analýza impedancie nabitého článku.....	34
7.7	Frekvenčná analýza impedancie vybitého článku .....	36
7.8	Počiatkové experimenty .....	37
7.9	Grafické znázornenie vnútorného odporu pre rôzne veľkosti amplitúd striedavého prúdu .....	39
7.10	Grafické znázornenie vnútorného odporu pre signál sínus, square a triangle .....	48
7.11	Grafické znázornenie vnútorného odporu pre rôzne hodnoty frekvencie na článku .....	50
<b>8</b>	<b>Záver</b>	<b>57</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>58</b>
	<b>Zoznam symbolov, veličín a skratiek</b>	<b>59</b>

# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1: Nabíjanie a vybíjanie oloveného článku.....	15
Obr.2.2: Konštrukcia klasického oloveného akumulátora [4] .....	16
Obr. 2.3: Konštrukcia článku akumulátora [5] .....	18
Obr. 2.4: Detail spojok vývodov článkov [6] .....	18
Obr. 2.5: Zátka akumulátora so závitom [5] .....	19
Obr. 2.6: Tvary pólových vývodov akumulátora [5] .....	20
Obr. 2.7: Indikátor hustoty elektrolytu [5].....	20
Obr: 5.1 Aktívna hmota bez sulfatácie(vľavo), zväčšená sulfatácia (vpravo) po 550 násobnom zväčšení [10], [11] .....	24
Obr. 6.1: Schéma pre meranie vnútorného odporu článku – vľavo [5], .....	25
Obr. 6.2: Schéma pre meranie vnútorného odporu akumulátora striedavou metódou – vpravo .....	25
Obr. 7.1: NF zosilňovač signálu .....	27
Obr. 7.2: Bloková schéma meracieho pracoviska.....	28
Obr. 7.3: Zapojenie vybíjajúcich rezistorov .....	28
Obr. 7.4: Pohľad na článok a zosilňovač .....	29
Obr. 7.5: Meracie pracovisko .....	29
Obr. 7.6: Elektródy a separátor experimentálneho článku – vľavo, .....	30
Obr.7.7: Experimentálny článok - vpravo .....	30
Obr. 7.8: Programové prostredie Agilent VEE Pro .....	31
Obr. 7.9: Sínusový signál.....	32
Obr. 7.10: Obdĺžnikový signál.....	32
Obr. 7.11: Trojuholníkový signál .....	33
Obr. 7.12: Ramp signál .....	34
Obr. 7.13: Frekvenčná závislosť $Re$ a $Im$ zložky impedancie $Z$ článku v nabitom stave .....	35
Obr. 7.14: Závislosť imaginárnej zložky impedancie na reálnej zložke pre rôzne frekvencie článku v nabitom stave (Nyquistov diagram) .....	35
Obr. 7.15: Frekvenčná závislosť $Re$ a $Im$ zložky impedancie $Z$ článku vo vybitom stave .....	36
Obr. 7.16: Závislosť imaginárnej zložky impedancie na reálnej zložke pre rôzne frekvencie článku vo vybitom stave (Nyquistov diagram) .....	37

Obr. 7.17: Vybíjacia a nabíjacia charakteristika oloveného akumulátoru .....	38
Obr. 7.18: Vybíjacia a nabíjacia charakteristika experimentálneho článku .....	38
Obr. 7.19: Vybíjacia a nabíjacia charakteristika experimentálneho článku .....	39
Obr. 7.20: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 330$ mA .....	40
Obr. 7.21: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 161$ mA .....	41
Obr. 7.22: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 66,1$ mA .....	42
Obr. 7.23: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 16$ mA .....	43
Obr. 7.24: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 6,8$ mA .....	44
Obr. 7.25: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 3,6$ mA .....	45
Obr. 7.26: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 1,73$ mA .....	46
Obr. 7.27: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 37,1$ mA .....	47
Obr. 7.28: Sínusový signál, $f = 2$ kHz efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 0,211$ mA.....	48
Obr. 7.29: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 218$ mA .....	49
Obr. 7.30: Square signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 218$ mA .....	49
Obr. 7.31: Triangle signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 218$ mA .....	50
Obr. 7.32: Sínusový signál, $f = 50$ Hz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 36$ mA .....	51
Obr. 7.33: Sínusový signál, $f = 200$ Hz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 107$ mA.....	52
Obr. 7.34: Sínusový signál, $f = 1$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 161$ mA .....	53
Obr. 7.35: Sínusový signál, $f = 2$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 161$ mA .....	54
Obr. 7.36: Sínusový signál, $f = 10$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 139$ mA.....	55
Obr. 7.37: Sínusový signál, $f = 20$ kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu $I = 139$ mA.....	56

## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1: Chemické reakcie na elektródach.....	13
Tab. 2: Chemické zloženie elektród .....	13
Tab. 3: Zoznam prístrojov použitých v zapojení meracieho pracoviska .....	27

# ÚVOD

Elektrická energia zohráva dôležitú úlohu v našom každodennom živote. Má univerzálne použitie a môže byť ľahko premenená na svetlo, teplo, mechanickú energiu. Problémom však je, že elektrická energia môže byť uložená len obtiažne. Kondenzátory umožňujú jej uloženie, no množstvo aké sú kondenzátory schopné udržať je v porovnaní s dopytom po elektrickej energii malé pre väčšinu aplikácií. Všeobecne možno povedať, že skladovanie elektrickej energie vyžaduje premenu na inú formu energie. Energia chemických zlúčenín v batériách slúži ako pamäťové médium. Po prepuknutí chemického procesu v batérii dôjde k vzniku energie, ktorú možno čerpať z akumulátora v podobe elektrického prúdu. V niektorých prípadoch batérií sa môže tento proces obrátiť a batérie tak spätne dobíjať.

Batéria, je v bežnej praxi pojem používaný pre sústavu dvoch alebo viac elektrochemických článkov, ktoré sú navrhnuté tak, aby ich prevod chemickej energie na elektrickú prebehol iba raz. Je to vlastne sústava primárnych článkov.

Sekundárne batérie sú vratnými meničmi energie a sú navrhnuté pre opätovné nabíjanie a vybíjanie v stovkách až tisíckach cyklov. Počet cyklov nabití-vybití je jedným z hlavných parametrov charakterizujúcich príslušný akumulátor. Účinnosť vratných chemických reakcií, ktoré v nich prebiehajú je často prevyšujúca 99 %. Vďaka tejto vlastnosti je možné aktívne ich využívať po dlhý čas. Musíme brať však do úvahy dobu určenú na dobíjanie.

V posledných rokoch je priemysel zaoberajúci sa batériami na veľkom vzostupe. Tento rast je spôsobený širokým zvýšením použitia batérií v prenosnej technike a taktiež kvôli záujmu o nízke emisie vozidiel. Batérie sa vyrábajú vo veľa variantách veľkostí a pre rozsiahle uplatnenia. Sú schopné dodať výkony od jednotiek  $W$  do stoviek  $kW$ . Ročný celosvetový predaj batérií je v súčasnej dobe asi 50 miliárd dolárov, to znamená, že sa viac než zdvojnásobil oproti roku 1995 [1].

# 1 DELENIE ELEKTROCHEMICKÝCH ČLÁNKOV

## 1.1 Primárne články

Sú často hovorovo nazývané batérie. Jedná sa o články, ktoré majú obmedzené množstvo reaktantov. Najbežnejšími primárnymi článkami sú články s burelovou katódou a zinkovou anódou.

Počas vybíjania článku sa reaktanty spotrebovávajú na produkty, ktoré už nie je možné nabíjaním znovu previesť na pôvodné reaktanty. Ak je v nich solný elektrolyt, sú nazývané Leclanchéove články. V prípade, že obsahujú alkalický elektrolyt (roztok KOH), ide o alkalické Burelove články. Tie je možné prípadne aj dobíjať, t.j. majú vlastnosť článkov sekundárnych. Príbuznú vlastnosť majú aj ortuťové a striebro-zinkové články [3], [13].

## 1.2 Sekundárne články

U sekundárnych článkov sa stretávame tiež ako u článkov primárnych s obmedzeným množstvom reaktantov. Avšak produkty vzniknuté z reakcií pri vybíjaní článku je možné opäť previesť zavedením elektrického prúdu na pôvodné aktívne reaktanty. Elektrická energia použitá k nabitíu článku sa v článku nahromažďuje vo forme chemickej energie.

Napätie jedného článku sa pohybuje v rozsahu 1,2 až 2 V v závislosti od zvoleného akumulátoru. Pre dosiahnutie požadovanej veľkosti napätia sa články bežne spájajú a vzniká akumulátorová batéria. Dobrým príkladom je typická batéria používaná v automobiloch. Poskytuje napätie 12 V pri zapojených šiestich článkoch.

Sekundárne batérie komerčne dostupné v našich podmienkach je možné rozdeliť z hľadiska použitého elektrochemického systému do týchto skupín: olovené akumulátory, alkalické akumulátory založené na systéme Ni – Cd, Ni – Fe, Ni – Zn, batérie na báze NiMH, Li – ion a Li – pol, alkalické akumulátory na báze MnO<sub>2</sub>, Zn – vzduch, batérie na báze Ag – Zn, batérie na báze Br<sub>2</sub> – Zn, Ni – H<sub>2</sub>, Na – S a podobne [1], [2].

## 1.3 Podľa spôsobu aplikácie

### Štartovacie akumulátory

Ich využitie je viac než známe. Používajú sa v doprave k spúšťaniu spaľovacích motorov vozidiel, lodí alebo diesela agregátov. Ich náplňou je poskytovať krátkodobé vysoké prúdy. Pri tom sa vybijie len zlomok ich kapacity. Následne sú pri výkone motoru nabíjané a udržiavané v nabitom stave.



## Staničné akumulátory

Poskytujú neustále napájanie elektrickou energiou v prípade, že nastane výpadok napätia z rozvodnej siete. Sú taktiež trvale dobíjané. Počas svojej životnosti absolvujú len malý počet cyklov, preto sa životnosť týchto batérií udáva v rokoch.

## Prístrojové akumulátory

Uplatnenie nachádzajú prevažne ako jediný zdroj elektrickej energie v rôznych mobilných zariadeniach, napríklad v mobilných telefónoch, prehrávačoch hudby atď. Používajú sa pre kapacity desiatín až desiatok ampérhodín. Typické je pre ne nestále zaťažovanie až do úplného vybitia.

## Trakčné akumulátory

Používajú sa napríklad na pohon elektromobilov, vysokozdvihných vozíkov a iných zariadení. Pracujú v cyklickom režime nabíjania – vybíjania, a teda ich životnosť sa udáva v rokoch používania [1], [6], [14].

## 1.4 Podľa stavu pri dodaní

- *Akumulátory suché, nenabité* – dodávané bez elektrolytu, aktívna hmota dosiek je v nenabitom stave.
- *Akumulátory suché, nabité* – akumulátor je vyrobený, nabitý, umytý a osušený, nepriedušne uzavretý a expedovaný bez elektrolytu.
- *Akumulátory suché, nabité, aktivované vodou* – rovnako ako u predchádzajúceho spôsobu, no navyše obsahuje každý článok púzdro s kyselinou sírovou. Po prerazení, alebo porozpustení puzdra stačí pri uvedení do prevádzky článok doplniť destilovanou vodou.
- *Mokrú, nabitú, uzavretú* – v tejto podobe je dodávaná väčšina z komerčne vyrábaných automobilových akumulátorov.
- *Mokrú nabitú, uzavretú, plynotesnú* – tento druh akumulátorov je vyrábaný bez zátok článkov. Zostávajú uzavreté a neuniká z nich elektrolyt ani plyn [13].

## 1.5 Podľa elektrolytu

- *Kyslé elektrolyty* – určené pre použitie v olovených akumulátoroch.
- *Alkalické elektrolyty* – majú využitie hlavne v akumulátoroch typu NiCd, AgZn, a v palivových článkoch.
- *Neutrálné elektrolyty* – napríklad horčičkové články aktivované vodou s obsahom chloridov.
- *Nevodné elektrolyty* – sú použiteľné len tie, v ktorých môže dochádzať k disociácii rozpustených solí a alkalické kovy ktoré sa nerozpúšťajú za vývoja vodíku. Jedná sa o napríklad oxid siričitý a amoniak.
- *Taveniny solí* – obsahujú pohyblivé ióny oboch polarít schopné reakcie. Články pracujú pri teplotách roztavených solí 400 - 600 °C.
- *Tuhé elektrolyty* – sú tvorené spravidla unipolárnymi iónovými kryštálmi s unipolárnou vodivosťou, ktorá je výrazne závislá od teploty [13].

## 2 OLOVENÉ AKUMULÁTORY

### 2.1 Charakteristika [1] [3] [4]

V dnešných dňoch sa považujú olovené akumulátory za najpoužívanejšie sekundárne zdroje prúdu. Prečo je využitý práve olovený akumulátor, ktorého princíp sa od jeho vzniku podstatne nezmenil? Táto skutočnosť je daná hlavne dobre zvládnutou technológiou výroby, prijateľnou cenou, spoľahlivosťou, účinnosťou a dobrým výkonom. Vyrábajú sa v kapacitách rádovo od 1 až do 10000 Ah. Oproti konkurenčným elektrochemickým akumulátorom majú širokú paletu predností. Medzi ne patrí hlavne dobrá dostupnosť olova, vysoké menovité napätie, životnosť, ktorá sa pohybuje v rozmedzí sto až niekoľko tisíc nabití a vybití. Sú známe vyše 100 rokov, napokon prvý olovený akumulátor bol zhotovený v roku 1859 francúzskym bádateľom Gastonom Planté. Vzhľadom k perspektívnosti (hlavne v automobilovom priemysle) sa uvažuje s ich ďalším zdokonaľovaním. Medzi nevýhody bezpochyby patrí veľká hmotnosť olova a teda samotného akumulátora.

Ak skúmame množstvo predaných batérií v celosvetovom meradle, tak olovené akumulátory predstavujú až 60 % z celého objemu.

Po veľmi veľkom zjednodušení je možné usúdiť, že olovený akumulátor je tvorený olovenými doskami (elektrodami), ponorenými do zriedenej kyseliny sírovej. Jeden článok akumulátora je tvorený dvomi doskami. Články sa radia do série a vytvárajú akumulátorovú batériu.

Princíp činnosti akumulátorov s kyslým elektrolytom je založený na chemických dejoch prebiehajúcich v aktívnej hmote. Tie sú podrobne opísané tromi chemickými rovnicami. Prvé dve opisujú reakcie v rámci kladnej a zápornej elektródy. Tretia už opisuje chemické reakcie v rámci celého článku. Šípky znázorňujú pracovný režim akumulátora: vybíjanie ( $\Rightarrow$ ), nabíjanie ( $\Leftarrow$ ). Menovité napätie jedného článku je 2 V.

Tab. 1: Chemické reakcie na elektródach

<i>Kladná elektróda (+):</i>	$\text{PbO}_2 + 3\text{H}^+ + \text{HSO}_4^- + 2\text{e}^- \Leftarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
<i>Záporná elektróda (-):</i>	$\text{Pb} + \text{HSO}_4^- \Leftarrow \text{PbSO}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$
<i>Celý článok:</i>	$\text{PbO}_2 + \text{Pb} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \Leftarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Z týchto chemických rovníc je možné určiť chemické zloženie elektród pre nabitý a vybitý stav akumulátora, ktoré je nasledovné:

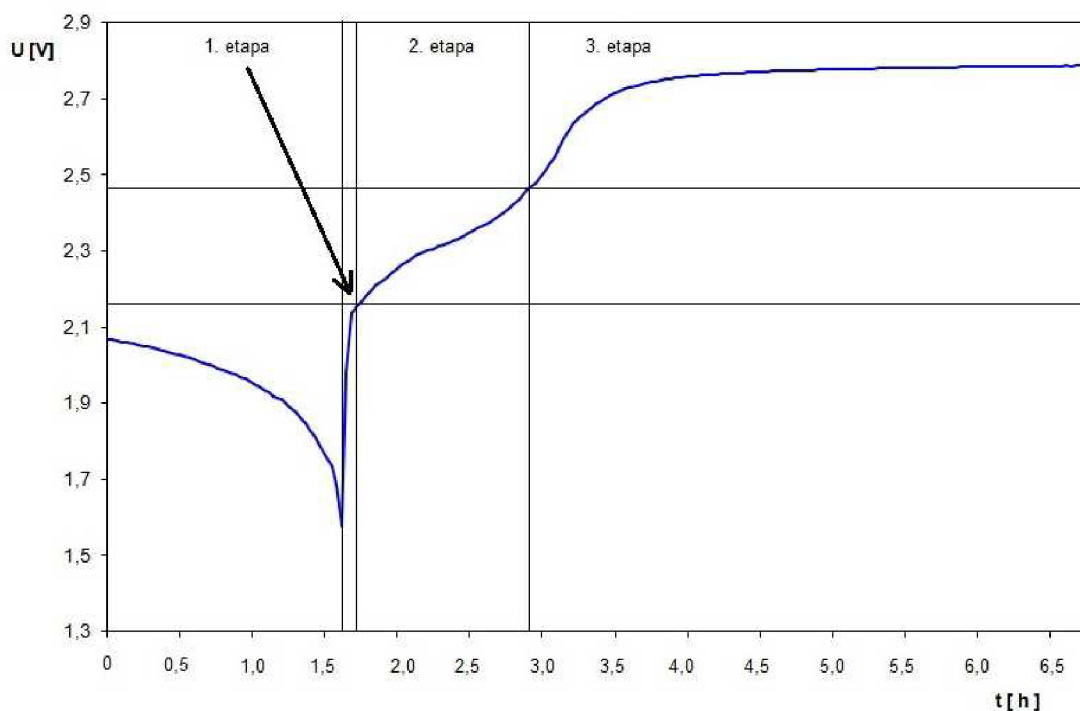
Tab. 2: Chemické zloženie elektród

	Kladná elektróda (+)	Záporná elektróda (-)
V nabitom stave	$\text{PbO}_2$	hubovité Pb
Vo vybitom stave	$\text{PbSO}_4$	$\text{PbSO}_4$

Nosná konštrukcia kladnej elektródy je vytvorená z olova. Pre zlepšenie jej mechanických a elektrických vlastností sa do olova ešte pridáva malé množstvo antimónu (Sb), vápnika (Ca), selénu (Se) alebo cínu (Sn). Pre kladnú mriežkovú, tyčovú, alebo trubicovú elektródu je možné vytvoriť nasledujúce kombinácie materiálov: Pb, Pb+Sb, Pb+Ca, Pb+Ca+Se (Sn). Záporná elektróda je realizovaná ako mriežková z Pb+Sb. Použitie tekutého elektrolytu so sebou prináša aj mnoho problémov pri manipulácii s akumulátorom. V prípade prevrátenia alebo poškodenia puzdra hrozí vytečenie elektrolytu z akumulátora, čo by znamenalo degradáciu vysušených článkov a tým aj úplné zničenie akumulátora. Ďalej môže dôjsť k poškodeniu napájaného zariadenia, keďže  $H_2SO_4$  rozleptáva kov a jeho zliatiny. Preto musia olovené akumulátory pracovať vo zvislej polohe. Ďalšou nevýhodou tekutého elektrolytu je jeho odparovanie. Odparuje sa iba destilovaná voda, ktorú je potrebné v prípade potreby dolievať, z čoho vyplýva potreba pravidelnej údržby týchto akumulátorov. Zvlášť nebezpečné je dobíjanie akumulátora, kvôli uvoľňovaniu vodíka z elektrolytu. Pri nabíjaní je preto potrebné zabezpečiť odvod plynov (exhalátov) z akumulátora a jeho okolia dobrým vetraním.

Významným ukazovateľom stavu akumulátora je zväčšujúce sa napätie pri nabíjaní a zvyšujúca sa hustota  $H_2SO_4$ . Pomocným ukazovateľom je tzv. plynovanie elektród. Z akumulátora totiž pri nabíjaní unikajú bubliny, ako keby sa elektrolyt „varil“. Tento jav však poukazuje na to, že je ukončený rozklad síranu olovnatého, a že sa začína elektrolýza vody. Voda sa pri nabíjaní rozkladá na vodík a kyslík. Z toho plynie potreba, aby akumulátory nabíjané vo väčších množstvách boli uskladnené vo vetraných miestnostiach alebo na voľnom priestranstve. Zmes vodíka a kyslíka tvorí výbušný plyn, ktorý môže pri nahromadení explodovať. Počas vybíjania sa tvorí na oboch elektródach ťažko rozpustný síran olovnatý. Jeho merná vodivosť je vzhľadom k vodivosti olova a oxidu olovičitého veľmi malá, menšia než  $10^{-8} \text{ Scm}^{-1}$ . Veľký význam pre funkciu elektród má ich pórovitá štruktúra umožňujúca prienik  $H_2SO_4$  do objemu elektród. Poréznosť nabitých elektród môže byť až 50 % a stredný priemer pórov je u kladných elektród 1 až 2  $\mu\text{m}$  a u záporných elektród 10  $\mu\text{m}$ . Počas vybíjania poréznosť značne klesá, pretože merný objem síranu olovnatého je väčší než merný objem olova a oxidu olovičitého. V nabitých akumulátorových článkoch je koncentrácia  $H_2SO_4$  28 až 40 % (podľa typu akumulátora). Čím menší je objem elektrolytu v porovnaní s množstvom aktívnych elektródových materiálov, tým väčší je pokles koncentrácie pri vybíjaní; ku koncu vybíjania sa koncentrácia pohybuje medzi 12 až 24 %. Z tohto dôvodu je bezprúdové napätie nabitého akumulátora 2,06 až 2,15 V a napätie takmer vybitého akumulátora je 1,95 až 2,03 V. Pre daný akumulátor je pokles koncentrácie, resp. hustoty elektrolytu ideálnou možnosťou ako určiť stupeň nabitia akumulátora. Je to bezpochyby výhodou oloveného akumulátora v porovnaní s inými typmi. Počas vybíjania sa objem elektrolytu znižuje o približne 1 ml na každú apmérhodinu.

Pre nabíjanie a vybíjanie oloveného akumulátora sú typické krivky podľa obr.2.1, ktoré pochádzajú z nášho merania.



Obr. 2.1: Nabíjanie a vybíjanie oloveného článku

Napät'ová krivka prebieha počas nabíjania celkovo tromi pásmami. Prvé pásmo je v oblasti medzi napätím po pripojení nabíjacieho prúdu a je charakterizované zväčšovaním napätia v súvislosti s tvorbou kyseliny v póroch olovených dosiek. Ide o oblasť medzi napätím 1,65 V až 2,18 V. Druhé pásmo premeny síranu olovnatého je ohraničené napätím 2,18 až 2,47 V. Ak sa zväčší napätie článku pri nabíjaní až na 2,47 V, začne sa okrem síranu rozkladať aj voda na vodík a kyslík a akumulátor začne plynovať. V prípade, že sa rozloží všetok síran, zväčší sa napätie článku na 2,7 až 2,8 V. Od tohto okamihu sa privádzaná energia spotrebúva len na rozklad vody, akumulátor začne intenzívne plynovať a jeho napätie sa už nezväčšuje.

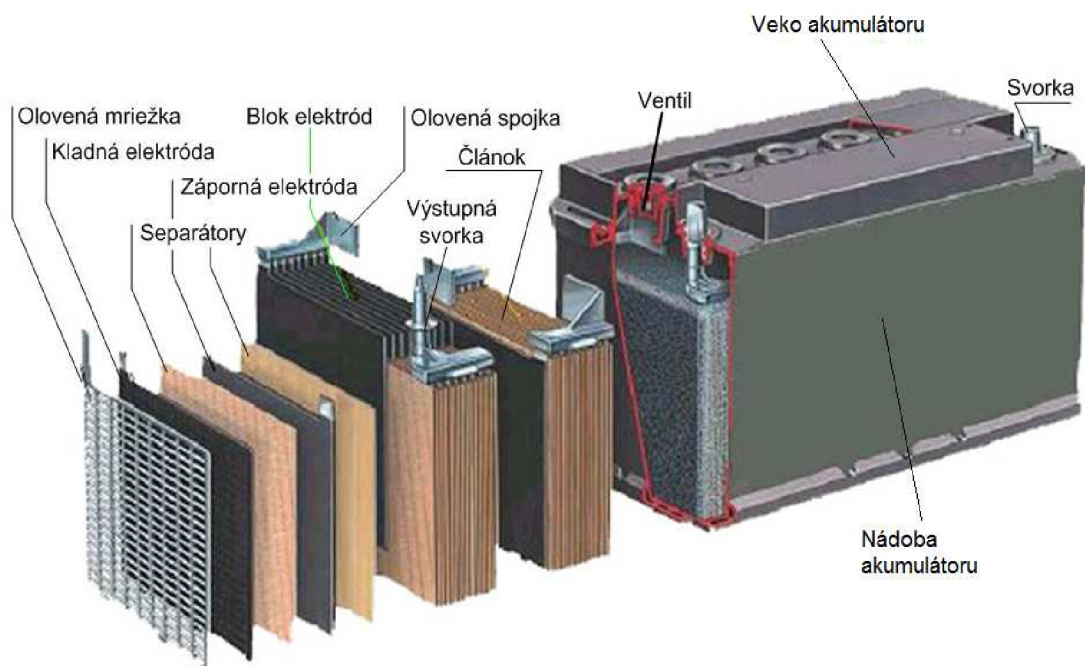
Vnútorý odpor oloveného akumulátora je veľmi malý, v našom prípade sa pohybuje v okolí hodnoty  $0,15 \Omega$ . Závisí od konštrukcie, stavu nabitia dosiek, hrúbky elektród, aktívnej plochy, vzdialenosti dosky, hustoty a teploty elektrolytu. Pri nabíjaní sa vnútorý odpor akumulátora znižuje, pri vybíjaní sa zväčšuje. Vybitý akumulátor má asi dvakrát väčší vnútorý odpor oproti akumulátoru nabitému. Pri znižovaní teploty sa zväčšuje vnútorý odpor akumulátora asi o  $0,4 \% / ^\circ\text{C}$ .

Kapacita akumulátora súvisí priamo úmerne s plochou elektród, respektíve s množstvom účinnej hmoty, ktorá sa zúčastní vratnej chemickej premeny. Pretože kapacita akumulátora závisí aj na veľkosti vybíjacieho prúdu, udáva každý výrobca zaručenú minimálnu kapacitu akumulátora pri určitom prúde, čo väčšinou býva prúd veľkosti 1/10 kapacity akumulátora v ampérhodinách po dobu 10 hodín.

## 2.2 Konštrukcia olovených akumulátorov [3] [5]

Konštrukcia oloveného akumulátora Obr.2.2 pozostáva z mriežkovaných olovených dosiek, vzájomne oddelených separátormi z chemicky a elektricky neaktívneho materiálu.

Do mriežky dosky je uložený aktívny materiál v pastovitej konzistencii. V priebehu výroby sa pasta vypáli, pričom sa pevne spojí s mriežkou. Kladné elektródy sú počas prevádzky viac namáhané čím vzniká väčšie nebezpečenstvo uvoľnenia aktívnej hmoty a jej následného usadzovania na dne článku. Systém dosiek je prepojený olovenými spojkami, ktoré sú následne ukončené výstupnými svorkami plochého alebo guľatého tvaru. Tie umožňujú pripojiť akumulátor k napájanému obvodu.



Obr.2.2: Konštrukcia klasického oloveného akumulátora [4]

### 2.2.1 Nádobu akumulátora

Nádoba akumulátora zlučuje dve funkcie. Prvou z nich je nádrž pre elektrolyt a druhou je ochranný obal. Tento systém pozostáva z niekoľkých oddelených buniek, ktoré obsahujú jednotlivé články. Dosky článkov sú upevnené v dostatočnej vzdialenosti od dna nádoby. Tým je docielené vytvorenie takzvaného kalového priestoru, kde sa zhromažďujú aktívne hmoty odpadnuté z povrchu elektród v priebehu životnosti článku. Materiály používané na konštrukciu nádoby sú väčšinou: tvrdá pryž, polypropylen alebo iné plastické hmoty. Kvalitné nádoby akumulátorov majú vlastnosti nehorľavých materiálov. Výhodou sú priehľadné plasty, umožňujúce kontrolu hladiny elektrolytu v nádobe, bez nutnosti demontáže viečok jednotlivých článkov. Pre rýchlu kontrolu minimálnej a maximálnej hladiny elektrolytu sú väčšinou nádoby vybavené značkami. Vzdialenosť medzi hornými hranami dosiek a vekom sa volí minimálne

20 mm, aby sa mohli kompenzovať zmeny hladiny elektrolytu a oddeliť kvapky elektrolytu pri silnom plynovaní na konci nabíjania.

### 2.2.2 Veko akumulátora

Veko akumulátora je pevne spojené s nádobou akumulátora. Pri pryžových nádobách je zaliate asfaltom, pri plastových nádobách je k nádobe zatavené alebo prilepené. Sú v ňom otvory pre pólové nástavce k pripojeniu kladného aj záporného vodiča k akumulátoru, niekedy tiež pre kladné aj záporné vývody jednotlivých článkov.

Pri väčšine akumulátorov sú vo veku zaskrutkované alebo tesne vsadené zátky jednotlivých článkov. Tieto zátky slúžia pre kontrolu stavu akumulátora a k doplneniu destilovanej vody do jednotlivých článkov. Súčasťou veka sú u niektorých batérií aj centrálné poistné ventily dovoľujúce únik pretlaku plynov pri zvýšenej činnosti batérie. Väčšina dnes vyrábaných akumulátorov má vo veku taktiež integrované sklopné držadlo pre jednoduché uchopenie a prenášanie batérie.

### 2.2.3 Separátory

Separátory mechanicky oddeľujú v článkoch kladné elektródy od záporných. Jedná sa o porézny materiál v tvare listov, presahujúcich zo všetkých strán okraje elektród, alebo v tvare obáliek. Do každej obáliek je vsunutá jedna kladná elektróda. Najčastejšie sa stretáme so separátormi týchto typov:

**Papierové (celulóзовé) separátory**, sú zhotovené z dlhovláknovej celulózy. Aby sme docielili zvýšenie odolnosti voči elektrolytu a elektrooxidácii, impregnujú sa napríklad fenolformaldehydovou živicom. Separátory sú lacné, v elektrolyte majú nízky elektrický odpor a pri veľkosti pórov 20 až 30  $\mu\text{m}$  umožňujú dobrú priechodnosť iónov  $\text{SO}_4$ . Ich životnosť zhruba zodpovedá životnosti klasických štartovacích akumulátorov.

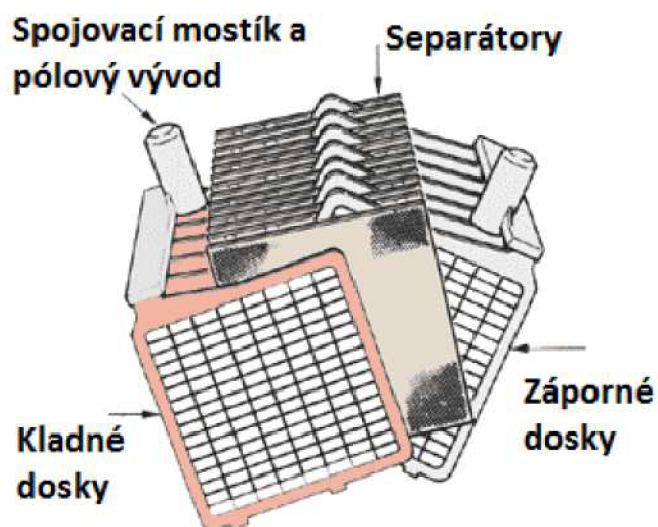
**Mikroporézne separátory**, vyrábajú sa napríklad z PVC, pryže, alebo vysokomolekulárneho polyetylénu s hrúbkami od 1 až do 0,1 mm, s veľkosťou pórov 5 až 0,03  $\mu\text{m}$ . Životnosť týchto separátorov presahuje životnosť akumulátorov.

**Separátory zo sklenených vlákien** niekedy dopĺňujú mikroporézne separátory v batériách pre náročné využitie. Sú umiestnené pri kladných elektródach a priaznivo ovplyvňujú životnosť akumulátorov.

Všeobecne teda platí, že správne separátory by mali umožňovať elektrolytu maximálny prechod iónov  $\text{SO}_4$  a súčasne zabraňovať prechodu kovových iónov z elektród jednej polarita na elektródu druhej polarita (t.j. skratu medzi elektródami). Musia mu klásť minimálny odpor [6].

### 2.2.4 Články

Paralelne spojené skupiny kladných a záporných elektród oddelené separátormi, zostavené ako časti zipsu, tvoria článok akumulátora (obr.2.3). Jednotlivé články sú umiestnené v oddelených bunkách nádoby akumulátora.

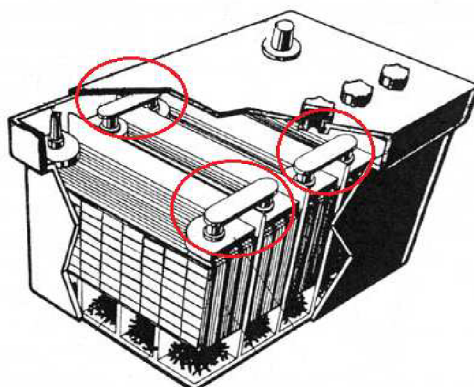


Obr. 2.3: Konštrukcia článku akumulátora [5]

### 2.2.5 Článkové a spojovacie mostíky

Všetky kladné a záporné dosky v článku sú prepojené článkovými mostíkmi zo zliatin olova. Každý článkový mostík článku je vybavený taktiež článkovým vývodom.

Články akumulátora sú následne prepojené do série pomocou spojovacích mostíkov ako je vidno na obrázku 2.4. Nádoby z tvrdenej pryže majú spojovacie mostíky nad viečkami článkov a sú jednoducho prístupné. Pri nádobách z plastov sú spojovacie mostíky vedené otvormi v stenách pod vekoma z vonkajšieho priestoru k nim nie je možný prístup.



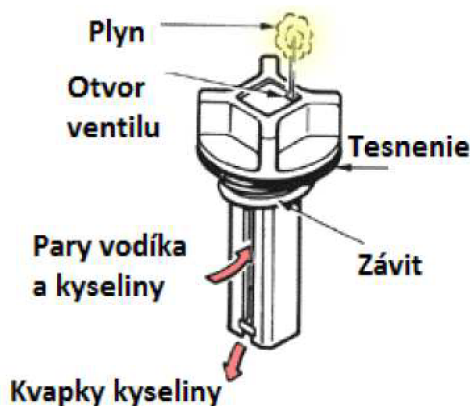
Obr. 2.4: Detail spojok vývodov článkov [6]



## 2.2.6 Zátky článkov

Zátky článkov sú vyrábané v mnohých prevedeniach, ako jednotlivé zátky tesne vsadené, s bajonetovým uzáverom, skrutkované, prípadne niekoľko zátok prepojených do pásu.

Sú navrhnuté tak, aby oddelili výpary kyseliny sírovej od plynov, ktoré sa uvoľňujú z článkov ako vedľajší produkt prebiehajúcich chemických reakcií. Kyselinové pary na zátke kondenzujú a odkvapkávajú späť do vnútorného priestoru batérie, zatiaľ čo vodík a kyslík v zátke môžu otvormi unikať do okolitej atmosféry. Niektoré akumulátory majú priestor pod zátkami jednotlivých článkov prepojený hadičkami, ktoré vedú kyselinové výpary mimo akumulátor. Konštrukcia takejto zátky je znázornená na obr.2.5. Pre tzv. bezúdržbové akumulátory sú vyrábané zátky s katalyzátorom pre rekombináciu unikajúceho kyslíka a vodíka na vodu. V zátke článku sú granule, na povrchu ktorých je nanosené paládium. Na katalyzátore sa molekuly plynov štiepia a zlučujú na vodu, ktorá steká naspäť do článkov. U trakčných batérií sa používajú zátky s plavákovým ventilom pre automatické dolievanie destilovanej vody v prevádzke.



Obr. 2.5: Zátka akumulátora so závitom [5]

## 2.2.7 Pólové vývody

V súčasnosti je na trhu dostupná široká škála prevedení pólových vývodov. Jedná sa častokrát o vývody kužeľové, umiestnené na hornej strane veka akumulátoru.

Kladný pól rozoznáme inštinktívne podľa symbolu "+", alebo "POS", červenej farby a väčšieho priemeru. Záporný pól je označený symbolom "-", alebo "NEG", farbou modrou a jeho priemer je menší. K obom pólom sú svorkami alebo skrutkami pripojené vodiče ideálne veľkých prierezov. Vyrábajú sa aj ďalšie typy pólových vývodov. Tzv. bočný (postranný) vývod a tzv. "L" vývod. Pri štartovacích akumulátoroch je najviac rozšírené prevedenie s horným vývodom pre pripojenie svorkami, ostatné prevedenia majú prípojku s vnútorným závitom (obr.2.6).





Obr. 2.6: Tvary pólových vývodov akumulátora [5]

### 2.2.8 Svorky pre pripojenie vodičov

Svorky pre pripojenie vodičov sú vyrobené z olova, ocele alebo z medi. Vodič je ku svorke upevnený lisovaným spojom, zaliatym alebo skrutkovaným spojom, svorka k pólovému vývodu skrutkovaným spojom.

### 2.2.9 Elektrolyt

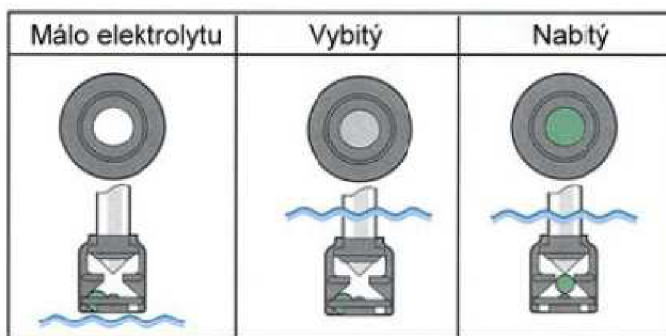
Elektrolyt je látka schopná vytvárať kladné a záporné ióny, umožniť vedenie prúdu a podieľať sa na chemických reakciách v článku.

Ako elektrolyt pre olovené akumulátory sa používa kyselina sírová. Je dodávaná pod názvom akumulátorová kyselina. Medzi elektrolytom a aktívnou hmotou dosiek prebiehajú chemické reakcie, ktoré spotrebujú (pri nabíjaní) a vytvárajú (pri vybíjaní) elektrický prúd. Kyselina sírová zostáva v akumulátore po celú dobu jeho životnosti, dopĺňa sa iba pri preukázateľnom úniku napr. vyliatím. Pri úbytku elektrolytu v prevádzke doplníme iba destilovanú vodu.

Pri práci s kyselinou a elektrolytmi akumulátora je potrebné dodržiavať potrebné bezpečnostné a hygienické opatrenia.

### 2.2.10 Indikátor hustoty elektrolytu

Niektoré akumulátory sú vybavené zabudovaným indikátorom hustoty elektrolytu. Farba terča indikátora udáva informáciu o hustote elektrolytu v danom článku. Poloha terča informuje o výške hladiny elektrolytu (obr. 2.7).



Obr. 2.7: Indikátor hustoty elektrolytu [5]

### 3 FORMOVANIE ELEKTRÓD

Formovanie elektród je proces vytvorenia aktívnej hmoty na elektródach počas výroby. Elektródy sa formujú v roztoku kyseliny sírovej. Výsledkom sú vrstvy oxidu olovičitého na kladnej elektróde a olovené huby na elektróde zápornej. Formácia je v podstate prvé továrenské nabitie článku, pri kontrole nabíjacieho prúdu, teploty a doby nabíjania pre vytvorenie požadovanej mikroštruktúry.

V olovených akumulátoroch sa ako elektrolyt používajú roztoky dostatočne čistej kyseliny sírovej. Ako už bolo spomenuté, v nabitom stave obsahuje roztok 28 až 40 % kyseliny sírovej čo je hustota asi  $1,26 \text{ g/cm}^3$ . Pri väčšej počiatočnej koncentrácii môže mať elektrolyt menší objem. Tým sa dosiahne aj zníženie nebezpečenstva zamrznutia elektrolytu na konci vybíjania pri nízkych teplotách. Avšak prílišné zväčšenie koncentrácie kyseliny je neprijateľné, pretože zväčší sulfatáciu elektród a samovybíjanie. Tým zníži životnosť akumulátora. Kapacita akumulátora závisí od hustoty kyseliny. V prípade, že sa nestaráme o správnu hustotu kyseliny, napr. dolievame iba destilovanú vodu do akumulátora, ktorý má praskliny, a zbavujeme sa tak kyseliny, urýchlujeme jeho zničenie. Z vlastností elektrolytu vychádza aj mrazuvzdornosť oloveného akumulátora. Úplne nabitý akumulátor s hustotou elektrolytu nezmrzne ani v okolí teplôt  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Avšak vybitý akumulátor môže zmrznúť i pri teplote tesne pod bodom mrazu. Ak zamrzne akumulátor, dôjde vplyvom väčšieho objemu ľadu najčastejšie k mechanickému poškodeniu monobloku, no najmä k nadmernej sulfatácii elektród [7].

### 4 HĽBKA VYBITIA A VYBÍJACÍ PRÚD

Kapacita akumulátora vyjadrená v Ah je celkové množstvo elektrickej energie, ktoré je akumulátor schopný dodať pri zaťažení menovitým prúdom. Podľa normy IEC 896-2 je kapacita definovaná pre desať hodinové vybíjanie konštantným prúdom do konečného napätia  $1,8 \text{ V}$  na článok.

Pretože však táto norma je doposiaľ iba návrhom, väčšina výrobcov používa pre stanovenie menovitej kapacity dvadsaťhodinový odber konštantného prúdu pri teplote  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a konečnom napätí  $1,72 \text{ V}$  na článok. Kapacita akumulátora je však samozrejme závislá od odoberaného prúdu, teploty v priebehu vybíjania, konečnom napätí a momentálnom stave batérie. Menovitý zaťažovací prúd je  $1/20$  kapacity akumulátora. Ak zaťažíme akumulátor iným prúdom ako menovitým, mení sa aj kapacita akumulátora a to nepriamoúmerne so zaťažovacím prúdom. Ak je zaťažovací prúd menší ako menovitý, kapacita akumulátora vzrastie a naopak. Akumulátor sa teda správa inak pre rôzne zaťažovacie prúdy. Je dôležité zoznámiť sa so správaním akumulátora pri hlbokom vybíjaní.

Toto správanie je možné objasniť na týchto príkladoch. Akumulátor s kapacitou napríklad  $4 \text{ Ah}$  bude vybíjaný prúdom rovným kapacite, teda  $4 \text{ A}$  až do nulového napätia. Akumulátor bude plne vybitý po približne  $30 \text{ min.}$ , kedy napätie bude asi  $1,5 \text{ V}$ /článok. Akumulátor je však teoreticky vybitý iba na  $50 \%$ . Pokiaľ budeme teraz

pokračovať vo vybíjaní aj pod toto napätie, teda až do 0 V, dokážeme akumulátor vybiť teoreticky asi na 75 %. Nikdy nedosiahneme pri takto veľkých prúdoch hodnotu 100 %. Preto sa akumulátor z tohto stavu veľmi ľahko zotaví a je možné ho bez problémov dobiť. Ak zaťažujeme tento akumulátor týmto spôsobom, nedôjde k jeho výraznej zmene životnosti.

Ten istý akumulátor budeme zaťažovať prúdom rovným 1/100 kapacity, teda 40 mA. Akumulátor bude plne vybitý (teoreticky zo 100 %) po 100 hodinách vybíjania. Konečné napätie je cca 1,75 V/čl. Pokiaľ budeme pokračovať vo vybíjaní konštantným prúdom až do nulového napätia, môžeme akumulátor zaťažovať ešte viac ako 100 hodín. Takto vyčerpáme z akumulátora všetku energiu, ktorú je schopný dodať. Tento typ vybíjania však môže spôsobiť poškodenie akumulátora, pretože je vysoká pravdepodobnosť nevratných zmien materiálov elektród [5][6].

## 5 NEGATÍVNE JAVY OLOVENÝCH AKUMULÁTOROV [7]

Aj u tohto zdroja elektrickej energie sa stretáme s niektorými problémami, ktoré sa môžu vyskytnúť v závislosti na spôsobe používania a uskladnenia. Je možné dosiahnuť obmedzenie týchto javov, a to správnou údržbou a používaním.

### 5.1 Samovybíjanie

Obe elektródy oloveného akumulátora sú termodynamicky nestále a v podstate môžu reagovať s vodným roztokom pri uvoľnení vodíku na zápornej a kyslíku na kladnej elektróde. Okrem toho môže oxid olovičitý reagovať chemicky s olovenou mriežkou.

Samovybíjanie je ale počas skladovania čerstvo vyrobeného nabitého akumulátora prakticky zanedbateľné a tvorí 2 až 3 % straty kapacity za mesiac. Samovybíjanie rastie s rastúcou koncentráciou  $H_2SO_4$  a s rastúcou teplotou. Rýchlo stúpa s cyklovaním akumulátora. Je to spôsobené rozpustením antimónu pri korózii mriežky kladnej elektródy. Antimón sa vylučuje na aktívnej hmote zápornej elektródy, uľahčuje vývin vodíku a podporuje tak koróziu olova. V praxi sa samovybíjaním akumulátorov s mriežkami, ktoré obsahujú veľké množstvo antimónu stráca až 30 % kapacity za mesiac. Súčasne samovybíjanie podporujú i početné látky v elektrolyte, napr. stopy solí železa.

### 5.2 Skraty

Počas práce oloveného akumulátora sa môžu vytvárať olovené mostíky medzi elektródami, ktoré spôsobujú skraty a tým tiež samovybíjanie.

Príčinami skratov môžu byť už spomínané javy. Sú nimi opadané častice oxidu

olovičitého, ktoré sa dostanú k zápornej elektróde, nakopenie vysokej vrstvy kalu, deformácie elektród, miskové zborenie zápornej elektródy a ďalšie.

### 5.3 Sulfatácia

Ak je olovený akumulátor skladovaný vo vybitom stave alebo je sústavne nedostatočne nabíjaný, dôjde k veľmi nežiaducemu procesu, k tzv. sulfatácii elektród (obzvlášť záporných).

Sulfatácia spočíva v postupnej premene jemne zrnitého síranu olovnateho na tvrdú hutnú vrstvu hrubozrnného síranu. Akumulátor so sulfátovanými elektródami sa veľmi ťažko nabíja, pretože nabíjacím prúdom sa skôr vyvíja vodík na zápornej elektróde než redukuje síran olovnatý.

Sulfatácii sa zabráni pravidelným dobíjaním akumulátora. Kapacita akumulátora so sulfátovanými elektródami sa obnoví naplnením zriedenou kyselinou sírovou (v ktorej je rozpustnosť síranu olovnateho väčšia), alebo dokonca destilovanou vodou a nabíjaním akumulátora malými prúdmi. Vznikajúca kyselina sa pravidelne vymieňa za zriedenejšiu alebo za vodu. Je častým javom, že určité množstvo síranu olovnateho zostane na doskách akumulátora. To po čase vybuduje tvrdú kryštalickú štruktúru.

Rýchlosť sulfatácie závisí od mnohých faktorov. Najmä od hĺbky vybitia, od dĺžky doby v ktorej zostane batéria vo vybitom stave po použití a teploty batérie počas nečinnosti [9].

#### Efekty sulfatácie:

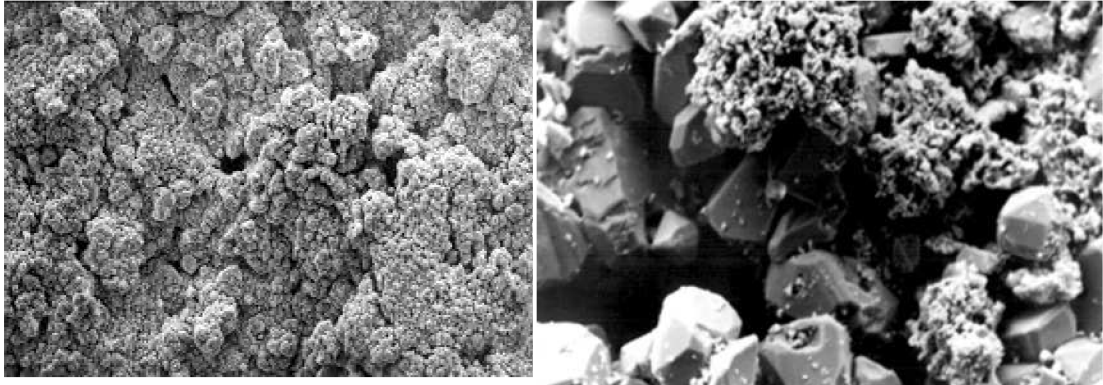
Zníženie ampérhodinovej kapacity –  $PbSO_4$  kryštály predstavujú stratený materiál na doskách. Z toho vyplýva zmenšenie aktívneho olova/oxidu uhličitého v doskách akumulátora, tým pádom batéria vyžaduje častejšie nabíjanie.

Zmenšenie dostupného prúdu –  $PbSO_4$  kryštály tvoria okolo dosiek akumulátoru malú izolačnú vrstvu. Platí, že čím väčšia je táto vrstva, tým viac je obmedzený maximálny prúd, ktorý môže batéria dodať. Existujú prípady, kedy môže byť hodnota prúdu znížená až na 10 % výrobné hodnoty.

Tvorba kalu – síran olovnatý je relatívne mäkký materiál. Padá ľahšie z dosiek akumulátoru než olovo/oxid olovičitý. Kal sa hromadí na dne nádoby akumulátora.

#### Minimalizácia sulfatácie:

- Udržovanie batérie v nabitom stave za použitia doporučených nabíjacích zdrojov
- Predchádzanie vysokým teplotám batérie a vysokým teplotám jej okolia, v ktorom je batéria používaná.



Obr: 5.1 Aktívna hmota bez sulfatácie(vľavo), zväčšená sulfatácia (vpravo) po 550 násobnom zväčšení [10], [11].

## 5.4 Vrstvenie elektrolytu

Ak skúmame stav, kedy je batéria vybíjaná, zistíme, že sa kyselina sírová mení čiastočne na vodu. Elektrolyt je rozdelený na oblasti s rôznou koncentráciou. Je to spôsobené tým, že  $H_2SO_4$  je hustejšia ako voda. V hornej časti akumulátoru je koncentrácia nižšia než v spodnej časti, kde môže byť miestami aj väčšia než je odporúčaná. Vrstveniu elektrolytu napomáha príliš nízke nabíjacie napätie a nedostatočná nabíjacia doba.

### Zamedzenie vrstvenia elektrolytu:

- *Plynovanie* – jednou z možných ciest, ako zabrániť vrstveniu elektrolytu je pomocou bublín, ktoré sa tvoria počas nabíjania a stúpajú hore. Teda nabíjame pri napätí okolo 2,6 V na článok. Nabíjanie musí byť starostlivo riadené, pretože vyššie napätie bude mať za následok vyšší nabíjací prúd, ktorý bude vďaka Jouleovým stratám spôsobovať teplo vo vnútri batérie.
- *Chvenie* – elementárny princíp využitia napríklad v idúcich motorových vozidlách [12].

# 6 MERANIE ČLÁNKOV AKUMULÁTOROV

## 6.1 Meranie vnútorného odporu akumulátora [5]

Jedným z dôležitých parametrov článku je jeho vnútorný odpor  $R_v$ . Dá sa zmerať spôsobom, aký je uvedený na obr. 6.1. Voltmetrom s veľkým vnútorným odporom zmeriame najprv napätie naprázdno  $U_0$ . Následne zopneme spínač S a zmeriame svorkové napätie na zaťaženom článku  $U_z$ . Odpor záťaže musí byť taký, aby zniesol prúdové zaťaženie aspoň 1/10 kapacity akumulátoru. Vnútorný odpor potom vypočítame pomocou rovníc ktoré vychádzajú z jednoduchého obvodu.

$$I_Z = \frac{U_Z}{R_Z} \quad (1)$$

a zároveň tiež platí:

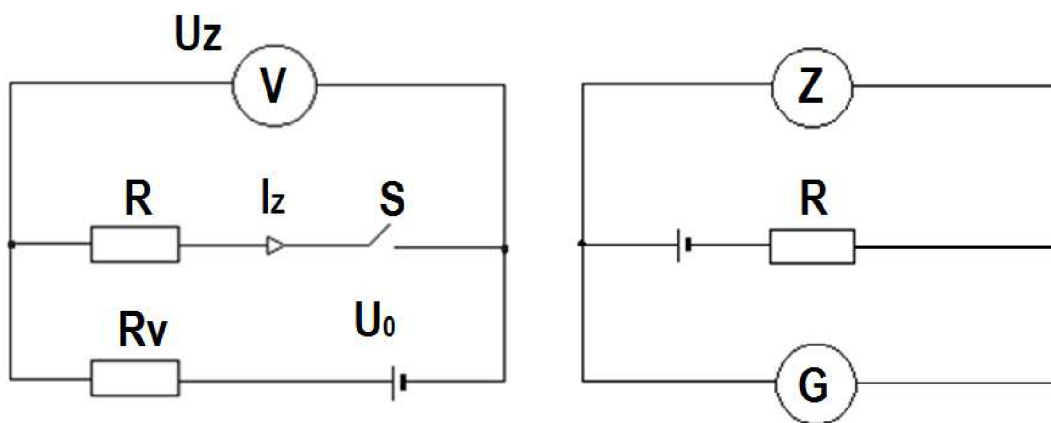
$$I_Z = \frac{U_0 - U_Z}{R_V} \quad (2)$$

Porovnaním týchto rovníc dostaneme výsledný vzťah pre vnútorný odpor:

$$R_V = \frac{R_Z(U_0 - U_Z)}{U_Z} \quad (3)$$

Vnútorný odpor článkov a akumulátorov nie je väčšinou konštantnou veličinou. Obvykle nás zaujíma jeho zmena počas vybíjania. Počas vybíjania akumulátora sa väčšinou vnútorný odpor zväčšuje, čo má za následok zmenšenie pracovného napätia. Táto metóda je pre naše účely nedostatočná. Meranie napätia pri státi je problematické. Taktiež není možné napr. nastaviť časový interval, pri ktorom sa má napätie merať.

Ďalej platí, že podľa veľkosti vnútorného odporu nie je možné určiť vek a opotrebenie akumulátora. Tieto údaje je možné spoľahlivejšie zistiť zo správania akumulátora pri kontrolovanom nabíjaní, alebo vybíjaní kedy sú zisťované nabíjacie schopnosti v závislosti na čase, alebo pri vybíjaní meraním zotavovacej doby po krátkom veľkom prúdovom odbere.



Obr. 6.1: Schéma pre meranie vnútorného odporu článku – vľavo [5],

Obr. 6.2: Schéma pre meranie vnútorného odporu akumulátora striedavou metódou – vpravo

## 6.2 Meranie vnútorného odporu článku striedavou metódou

Jedná sa o metódu merania striedavým prúdom superponovaným na nabíjací prúd, ktorej schéma je vyobrazená na obr. 6.2. Hodnota referentného odporu činí  $0,28 \Omega$ . Generátor sínusového signálu je označený ako G a Z je vybíjací a nabíjací zdroj. V tomto meraní sú zo zdroja signálu generované signály: sínusový, obdĺžnikový, trojuholníkový a ramp signál.

Vnútorný odpor je možné vypočítať podľa vzťahu (4). Automatizované meracie pracovisko nám poskytuje hodnoty striedavého napätia na článku  $U_{\text{čl}}$  a striedavého napätia na meracom rezistore  $U_R$ . Pre náš experiment je použitý rezistor s hodnotou  $0,25 \Omega$ . Z rovnice (5) získame striedavý prúd vo vetve, v ktorej sa nachádza aj článok. Následne je možné vypočítať hodnotu  $R_v$  podľa rovnice (6).

$$R_v = \frac{U_{\text{čl}}}{\frac{U_R}{R}} = \frac{U_{\text{čl}} \cdot R}{U_R} \quad (4)$$

$$I_R = \frac{U_R}{R} \quad (5)$$

$$R_v = \frac{U_{\text{čl}}}{I_R} \quad (6)$$

# 7 PRAKTICKÁ ČASŤ

## 7.1 NF zosilňovač signálu

Prvotným krokom pred začatím vlastného merania bol návrh a zostrojenie NF výkonového zosilňovača (obr.7.1). Je dôležitou súčasťou pracoviska pre meranie vnútorného odporu akumulátora. Zabezpečuje, aby signál z generátoru bol dostatočne zosilnený a aby sa neprejavovalo jeho rušenie a degradácia.

Zosilňovač, ktorý sa skladá z dvoch vopred osadených dosiek plošných spojov EZK 001 a EZK 396. Doska EZK 001 je NF výkonový monofónny zosilňovač 32W s nesymetrickým napájaním. O jej napájanie sa stará doska EZK 396, ktorú tvorí nestabilizovaný napájací zdroj kladného napätia.

V rámci ochrany pred poškodením zosilňovača, bolo zistené, že nie je vhodné privádzať napätie na vstup zosilňovača pri jeho vypnutom stave. Prišlo by k nevratnému znehodnoteniu tranzistora na doske EZK 001.



Obr. 7.1: NF zosilňovač signálu

## 7.2 Zapojenie pracoviska

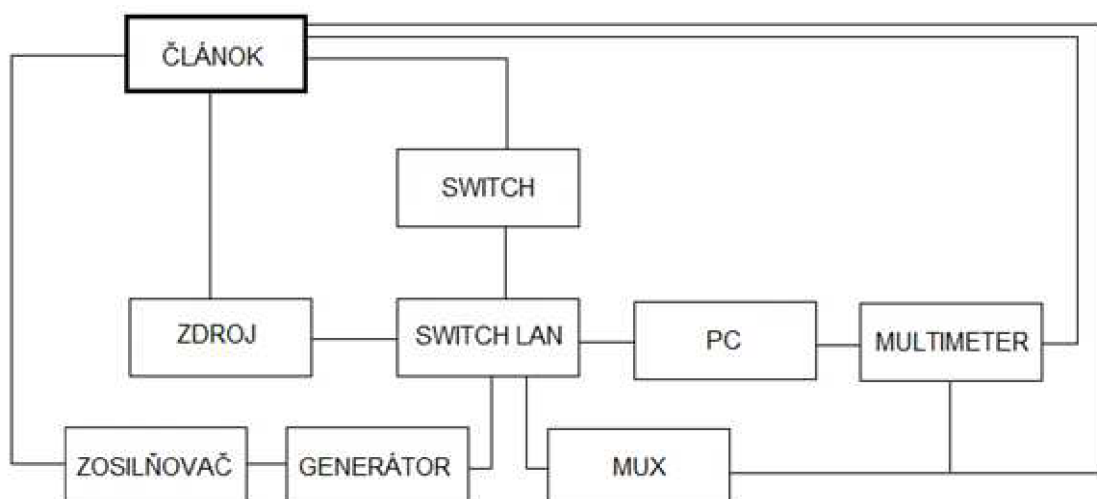
Riadiacim mozgom celého systému je PC vybavený programovým prostredím Agilent VEE Pro – cyklovaniRv. PC je spojený pomocou LAN káblu na LAN switch. K LAN switchu je postupne pripojený multiplexer, switch a generátor. Zosilňovač je zapojený spolu s generátorom signálu. Multimeter je pripojený na experimentálny článok a k PC. Zvyšné zapojenie zobrazuje bloková schéma na obr. 7.2.

Bližšia typová špecifikácia použitých zariadení je uvedená v tab.3. Na obr. 7.3 je zobrazené zapojenie vybijacích rezistorov. Obr. 7.4 popisuje použitý článok a zosilňovač a na obr. 7.5 je zobrazené meracie pracovisko v skutočnej podobe.

Tab. 3: Zoznam prístrojov použitých v zapojení meracieho pracoviska

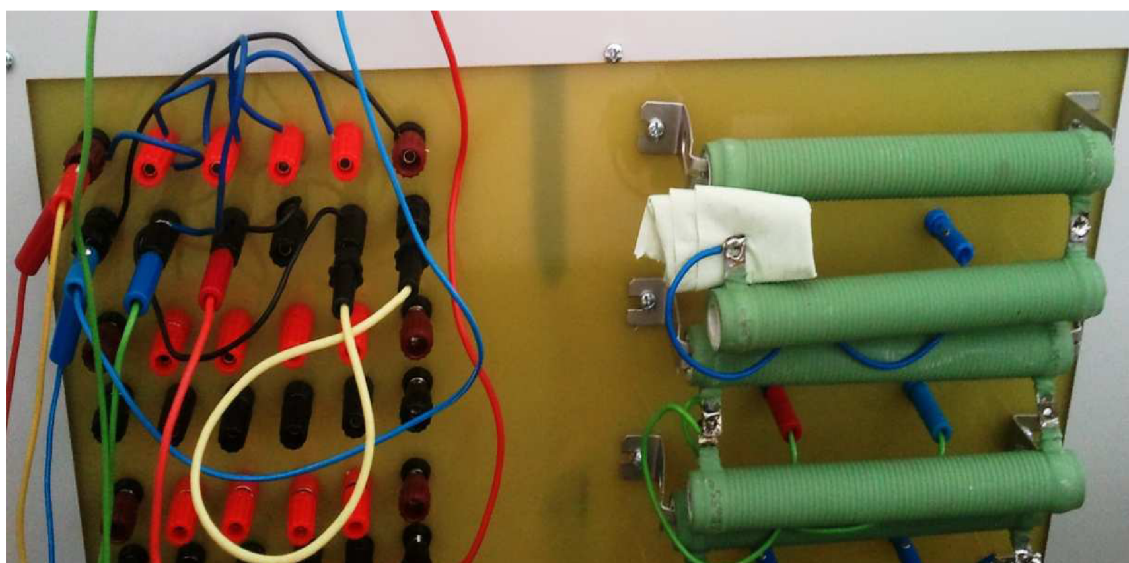
Prístroj	Špecifikácia
switch LAN	
PC	
digitálny multimeter	Agilent 34405A 5 ½
zdroj	Agilent N6700B Low Profile MPS Mainframe 4 slot-400W+N6743 modul 20V, 5A, 100W
switch	4437A 37 channel General purposes switch
zosilňovač	
generátor	Isolated D/A convertor 4451A 4 channel
multiplexer	4421A 40 ohm Armature
experimentálny článok	



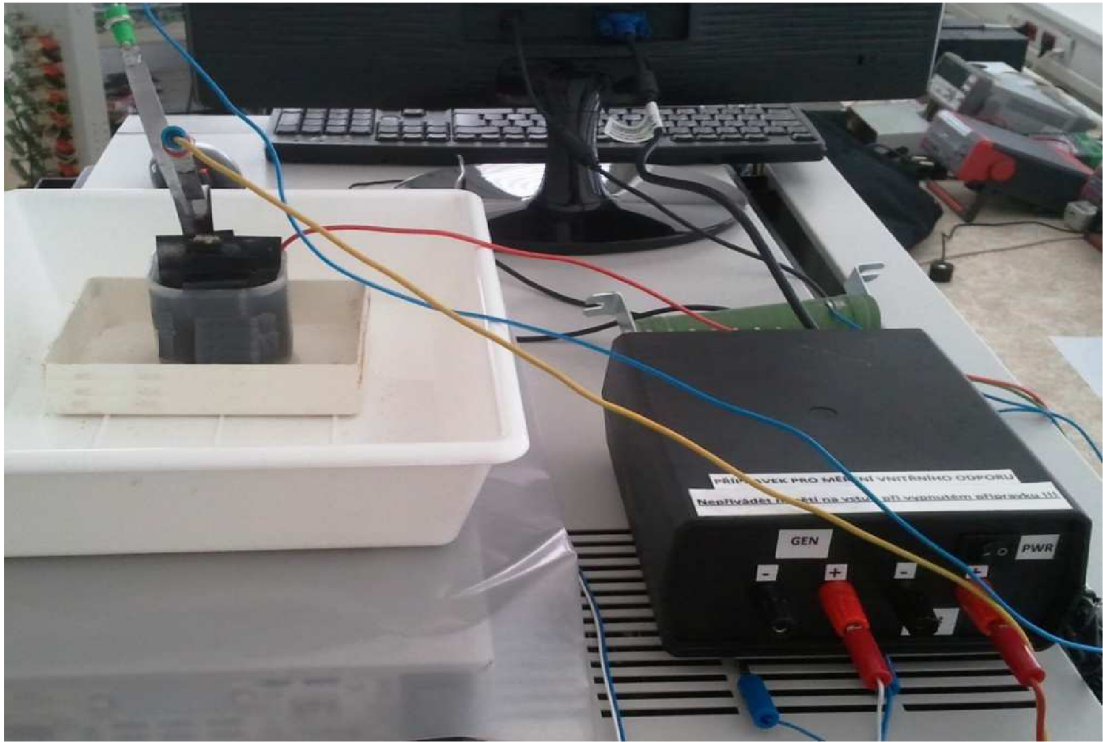


Obr. 7.2: Bloková schéma meracieho pracoviska

Meracie pracovisko využíva taktiež panel so svorkami (obr.7.3), kde svorka 1.(zľava) slúži ako prúdové svorky článku, 2. svorka na meranie jednosmerného napätia na článku, 3. pre meranie potenciálu kladnej elektródy, 4. pre meranie potenciálu zápornej elektródy, 5. svorka slúži pre meranie striedavého napätia na  $R = 0,28 \Omega$ , 6. svorka je určená pre meranie striedavého napätia na článku, na poslednej svorke je pripojený vybíjací rezistor s hodnotou  $R = 15 \Omega$ .



Obr. 7.3: Zapojenie vybíjacích rezistorov



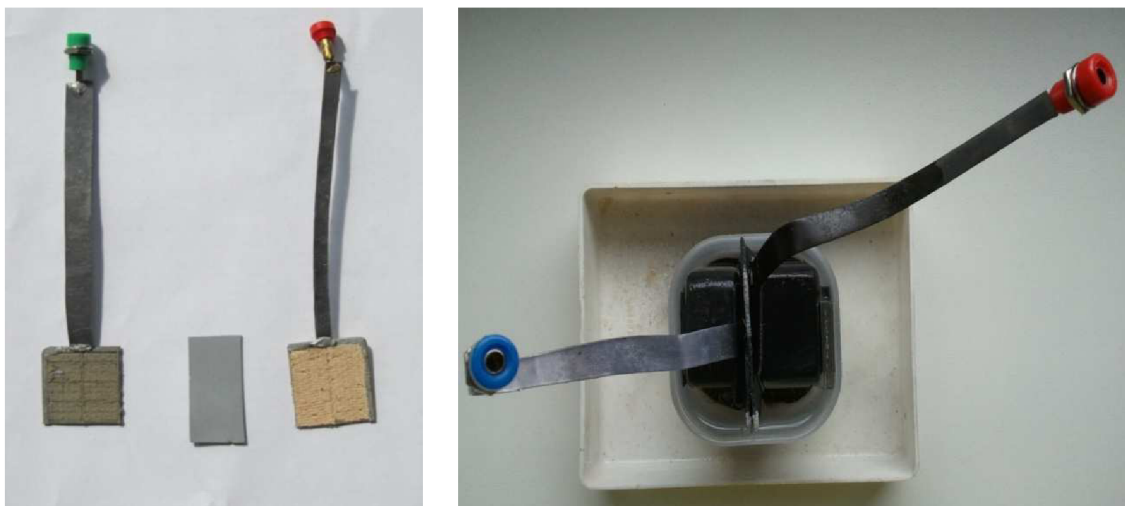
Obr. 7.4: Pohľad na článok a zosilňovač



Obr. 7.5: Meracie pracovisko

### 7.3 Článok

Článok použitý v rámci nášho merania bol vyhotovený z elektród nastrihaných z dosiek oloveného štartovacieho akumulátora. Následne boli k elektródam pripájkované konektory. Medzi elektródy bol vložený PE separátor. Článok bol vložený do plastovej krabičky, zaliaty elektrolytom a naformovaný (obr.7.7). Na obr.7.6 vpravo sa nachádza kladná elektróda, vľavo záporná a v strede je umiestnený separátor.



Obr. 7.6: Elektródy a separátor experimentálneho článku – vľavo,

Obr.7.7: Experimentálny článok - vpravo

### 7.4 Obslužný software pre cyklovanie článkov

Celé meranie je vykonávané pomocou programového prostredia Agilent VEE Pro. Software je navrhnutý pre automatizované cyklovanie experimentálnych článkov olovených batérií. Jedná sa o graficky orientované vývojové prostredie pre tvorbu programových aplikácií pre automatizované meracie procesy, riadenie a spracovanie dát. Veľký dôraz je kladený na jednoduchosť prepojenia s meracími prístrojmi prostredníctvom zberníc LAN, USB, GPIB, RS-232. Dostupné sú taktiež ovládače pre viac ako 1000 meracích prístrojov od 70 rôznych výrobcov [15].

Na Obr. 7.8 je zobrazený ovládací panel programu. Program zapisuje namerané hodnoty do súboru, ktorý je možný použiť pre ďalšie spracovanie dát (grafické znázornenie výsledkov). V stĺpcoch označených písmenami K, Z sa spúšťa meranie potenciálov kladnej a zápornej elektródy vo vnútri článku. Namiesto tlaku meriame striedavé napätie na článku a meracom odpore pre zistenie striedavého prúdu.

Automatizované meranie sa spúšťa tlačidlom *zapni program*. Predtým je nutné vyplniť číslo elektródy, vybrať funkciu merania, zvoliť pri nastavení nabíjania: limitačné napätie a nabíjací prúd a pri nastavení vybíjania konečné napätie a vybíjací prúd. Stupnica v pravej hornej časti programu ukazuje v akom štádiu sa nachádza prebiehajúci cyklus.



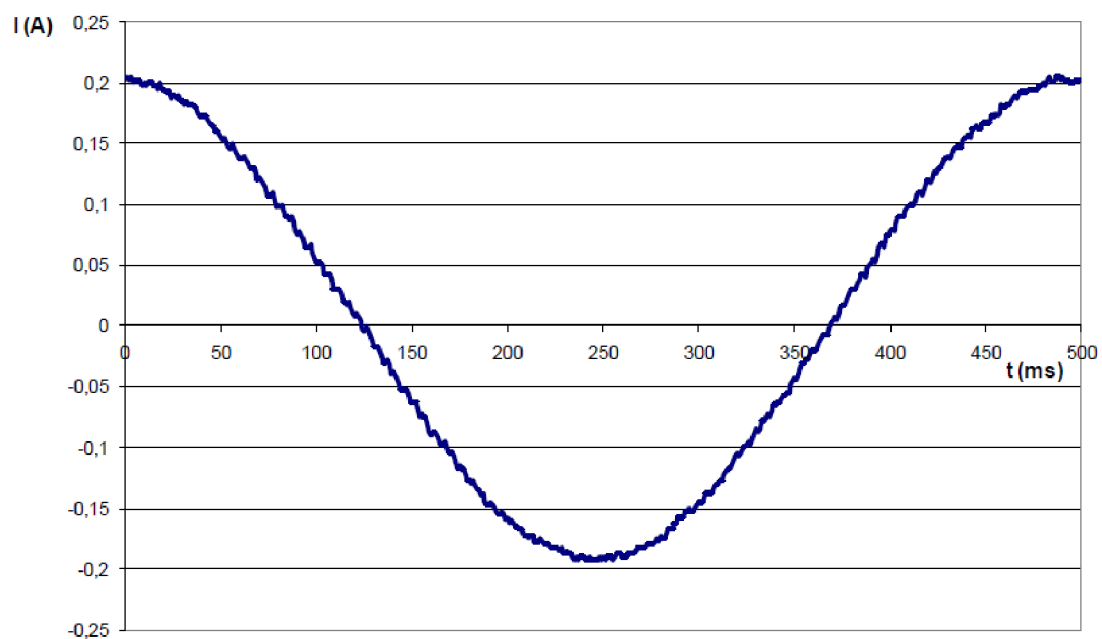
Obr. 7.8: Programové prostredie Agilent VEE Pro

## 7.5 Grafické priebehy striedavého prúdu používané pre meranie vnútorného odporu

Pre zadanú meraciu metódu budú použité štyri druhy striedavých signálov. Doposiaľ sme pracovali stále so signálom sínusovým (obr.7.9). Neskôr bude podrobne vypracované meranie i s ďalšími typmi signálov. Keďže sa jedná o striedavú metódu merania vnútorného odporu, je ku každému zo signálov pripojený i vzťah pre meranie efektívnej hodnoty.

Výpočet a odvodenie efektívnej hodnoty pre sínusový signál [16]:

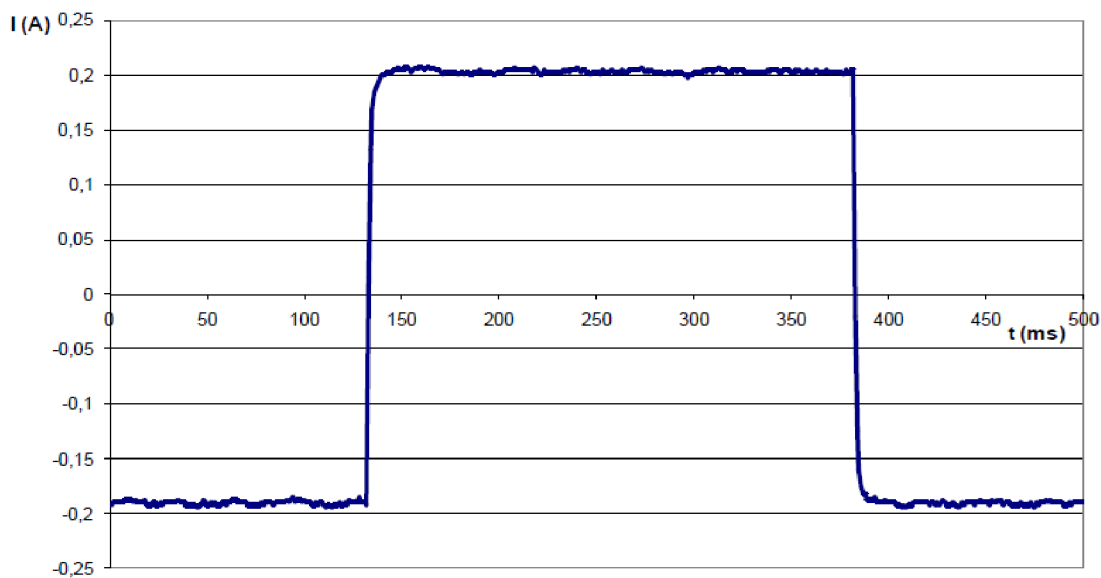
$$\begin{aligned}
 I_{ef} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega_0 t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega_0 t)}{2} dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \frac{1}{2} [t]_0^T} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m
 \end{aligned} \tag{7}$$



Obr. 7.9: Sínusový signál

Výpočet a odvodenie efektívnej hodnoty pre obdĺžnikový signál [16]:

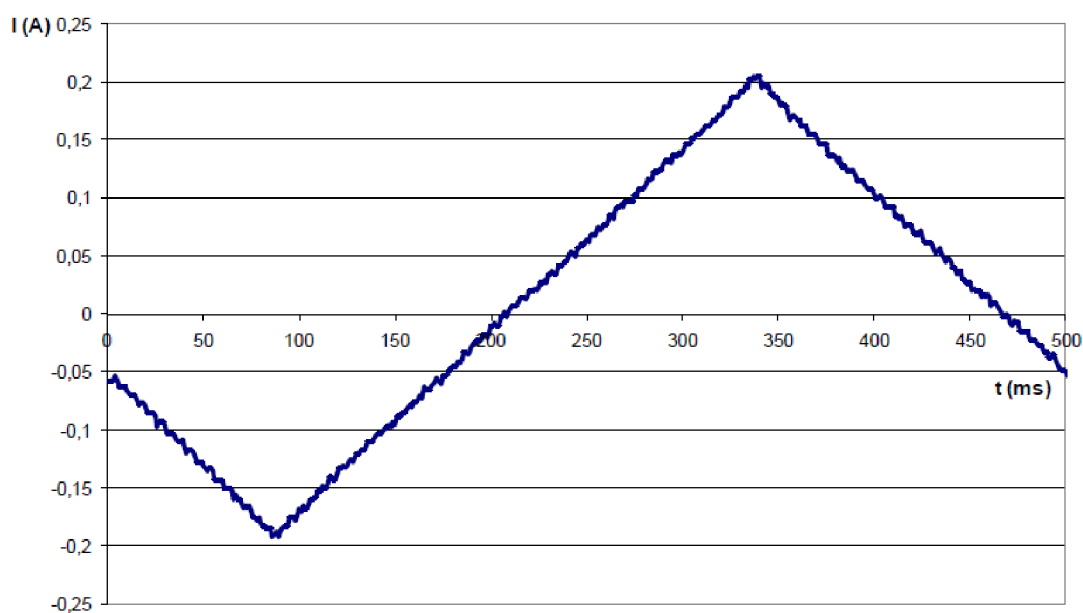
$$I_{ef} = \sqrt{\frac{\int_0^T I_m^2}{T}} dt = I_m \quad (8)$$



Obr. 7.10: Obdĺžnikový signál

Výpočet a odvođenje efektívnej hodnoty pre trojuholníkový signál [17]:

$$\begin{aligned}
 I_{ef} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \left( \frac{2}{T} * Im * t \right)^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \frac{4}{T^2} Im^2 \int_0^{\frac{T}{2}} t^2 dt} = \sqrt{\frac{8}{T^3} Im^2 \int_0^{\frac{T}{2}} t^2 dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{8}{T^3} Im^2 \frac{1}{3} [t^3]_0^{\frac{T}{2}}} = \frac{Im}{\sqrt{3}}
 \end{aligned} \tag{9}$$

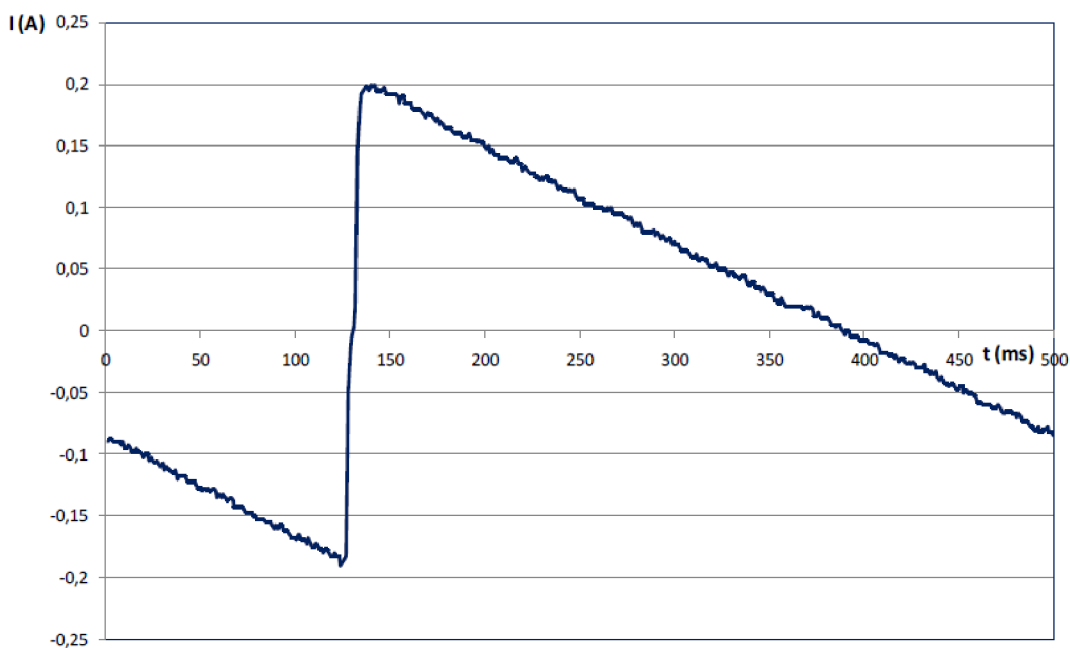


Obr. 7.11: Trojuholníkový signál

Výpočet a odvođenje efektívnej hodnoty pre Ramp signál je zhodný s trojuholníkovým priebehom [16]:

$$I_{ef} = \frac{Im}{\sqrt{3}} \tag{10}$$





Obr. 7.12: Ramp signál

## 7.6 Frekvenčná analýza impedancie nabitého článku

V nabitom stave bol článok podrobený frekvenčnej analýze impedancie pomocou meracieho zariadenia Autolab za pomoci softwaru EC-Lab for Windows v10.19 (obr. 7.13, obr. 7.14). Reálna a imaginárna zložka impedancie sa pohybujú v rozmedzí od 0,05 Hz do 141 kHz.

Z obrázku 7.13 je zrejmé jeho rozdelenie na dve hlavné oblasti. Prvou z nich je horná časť, kedy prevláda kapacitná zložka impedancie, pre nízke frekvencie od stotín Hz až do približne 10 kHz. Reálna a imaginárna zložka impedancie majú v tejto oblasti exponenciálne klesajúci priebeh. Kapacitná zložka má pôvod v rozhraní medzi elektrolytom a kladnou aktívnou hmotou a elektrolytom a zápornou aktívnou hmotou.

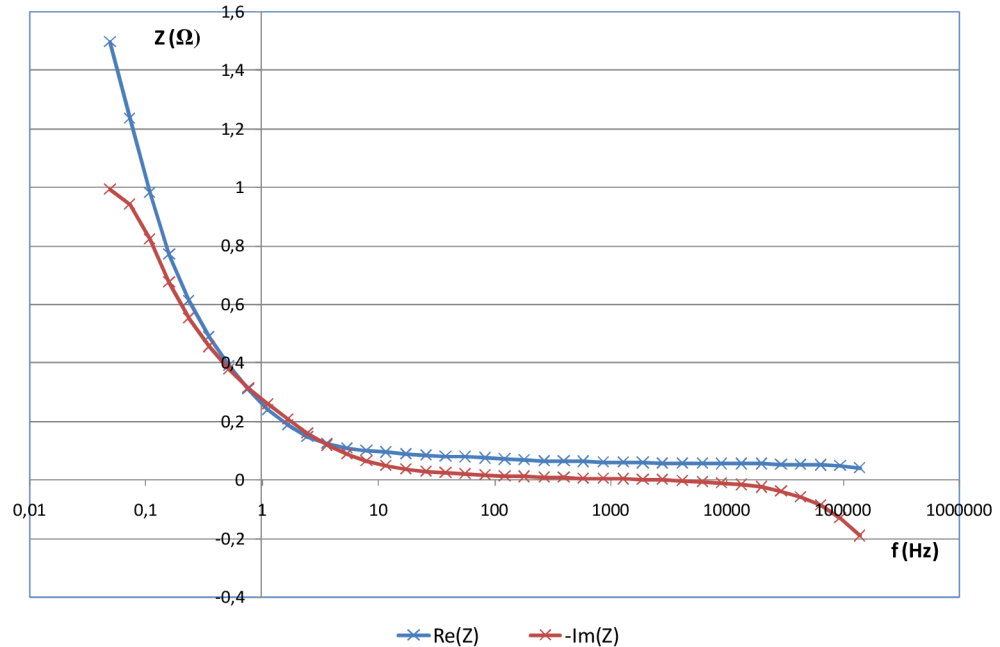
Ak skúmame dolnú časť charakteristík, vidíme, že reálna zložka impedancie má lineárne klesajúci priebeh od 10 Hz do 100 kHz. V intervale od 1 kHz do 10 kHz dosahuje reálna zložka minimálnych hodnôt a imaginárna zložka sa blíži hodnotám nulovým. Z toho vyplýva, že v tomto rozsahu frekvencií dosahujeme pri meraní vnútorného odporu najpresnejších hodnôt. Pre prvé merania bola stanovená frekvencia 2 kHz a amplitúda 0,5 V. Optimálna hodnota amplitúdy, frekvencie a tvaru signálu bude v ďalších experimentoch skúmaná.

Pre frekvencie vyššie než 10 kHz sa začína prejavovať indukčná zložka. Je spôsobená vďaka prívodom k experimentálnemu článku. V tejto oblasti je chyba väčšia ako nameraná hodnota.

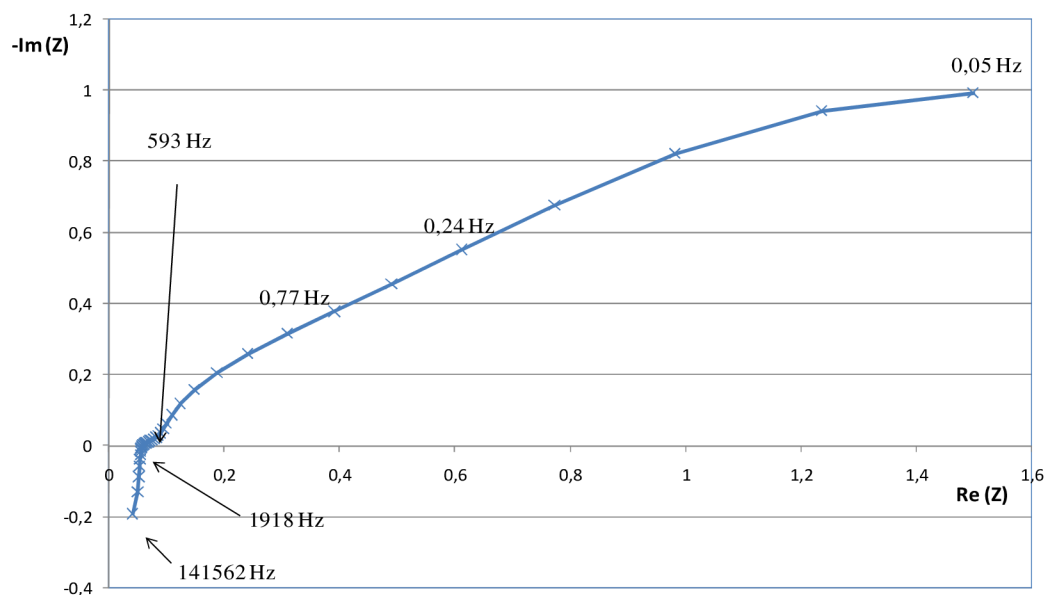
Na obrázku 7.14 je popísaný Nyquistov diagram, resp. závislosť imaginárnej zložky impedancie na reálnej zložke pre rôzne frekvencie článku v nabitom stave. Pre lepšiu orientáciu v grafe sú vyčíslené niektoré frekvencie. Opäť je zrejmé, že pri nízkych frekvenciách (0,05 Hz) sa prejavuje kapacitná zložka. V oblasti

jednotiek kHz sa hodnoty reálnej a imaginárnej zložky približujú nulovým hodnotám a teda kapacitná a indukčná zložka nevňášajú prímerní chyby do výsledkov.

Znovu vidíme, že pre frekvencie nad 10 kHz sa začína prejavovať indukčná zložka a meranie vnútorného odporu v tejto oblasti by rozhodne neprineslo spoľahlivé výsledky.



Obr. 7.13: Frekvenčná závislosť Re a Im zložky impedancie Z článku v nabitom stave



Obr. 7.14: Závislosť imaginárnej zložky impedancie na reálnej zložke pre rôzne frekvencie článku v nabitom stave (Nyquistov diagram)



## 7.7 Frekvenčná analýza impedancie vybitého článku

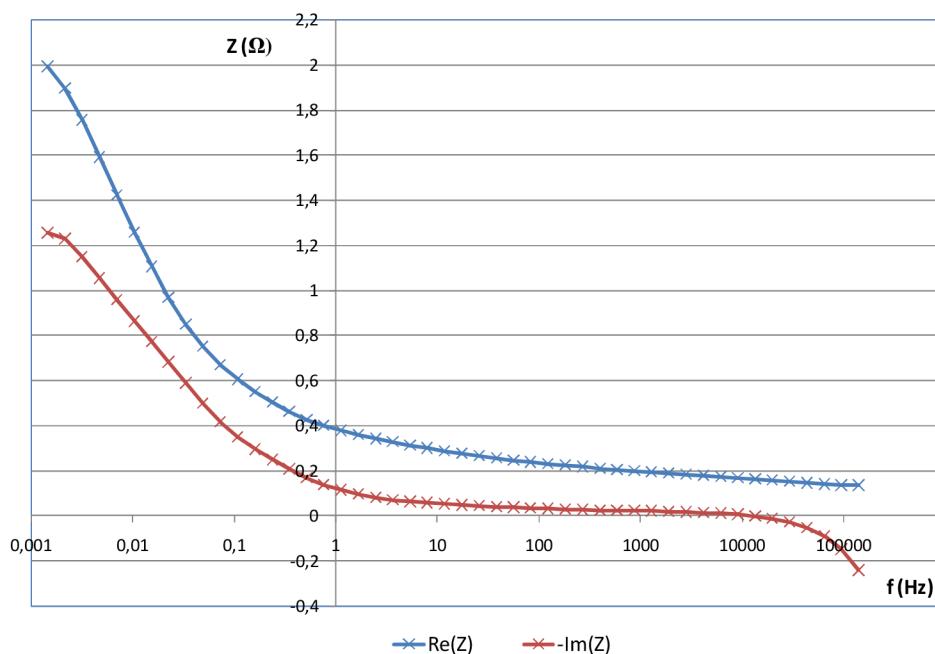
I vo vybitom stave bola na experimentálnom článku skúmaná frekvenčná analýza impedancie (obr.7.15, obr.7.16). V grafe je vidno dva priebehy reálnej a imaginárnej zložky impedancie. Interval, v ktorom sa pohybujú je v rozmedzí od 0,001 Hz do 141 kHz.

Je možné pozorovať reálnu zložku, ktorá s narastajúcou frekvenciou klesá. Pri nízkych frekvenciách pod 1 Hz má klesanie exponenciálny charakter. Od 1 Hz klesá viacmenej lineárne. V porovnaní s článkom v nabitom stave je vidno, že reálna zložka impedancie je posunutá o niečo vyššie.

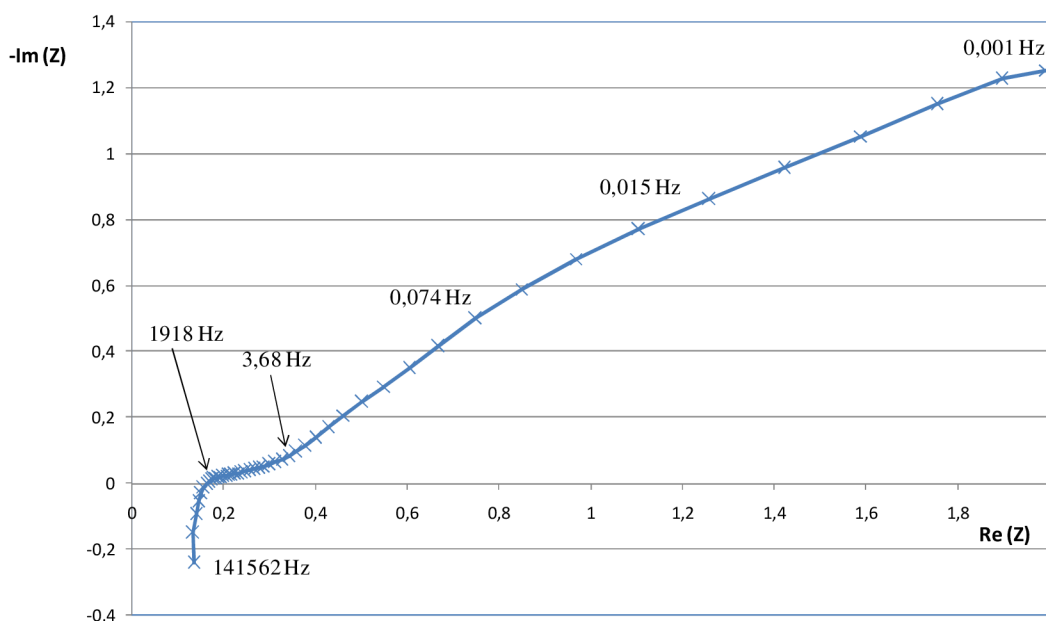
Aj imaginárna zložka má s rastúcou frekvenciou exponenciálne klesajúci charakter. Ďalej sa jej priebeh blíži k nule a v oblasti od 500 Hz je už odchýlka od nuly minimálna. V 20 kHz je najbližšia nule. Tu je aj najpresnejšie meranie. Je to značný rozdiel oproti nabitému stavu, kde nulová hodnota vychádza okolo 2 kHz. V ďalších vyšších frekvenciách sa prejavuje indukčnosť systému, imaginárna zložka rastie a tým pádom už nemôžeme použiť ďalšie frekvencie pre presné odčítanie vnútorného odporu.

Vybitý stav sa líši od nabitého nulovou - minimálnou hodnotou. V prvom prípade závislosť imaginárnej zložky impedancie na reálnej zložke pretína reálnu os  $Re(Z)$  v bode približne  $0,15 \Omega$  a v nabitom stave je táto hodnota  $0,05 \Omega$ .

Pre presné určenie vnútorného odporu sme po preskúmaní týchto priebehov stanovili frekvenciu 2 kHz pri nabitom článku.



Obr. 7.15: Frekvenčná závislosť Re a Im zložky impedancie Z článku vo vybitom stave



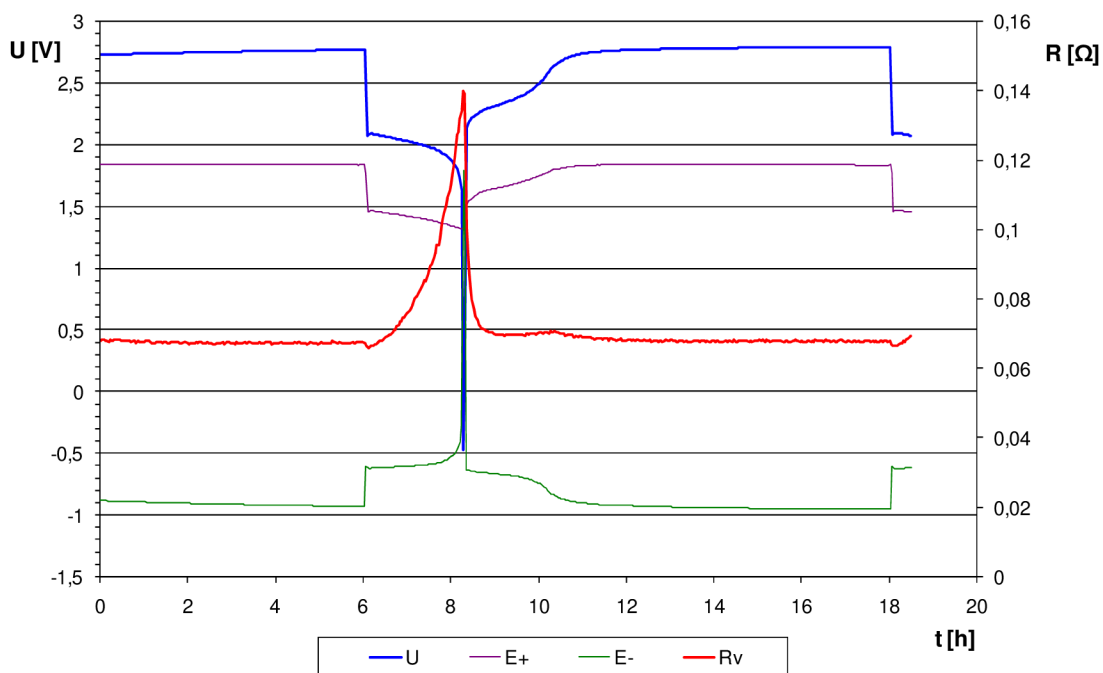
Obr. 7.16: Závislosť imaginárnej zložky impedancie na reálnej zložke pre rôzne frekvencie článku vo vybitom stave (Nyquistov diagram)

## 7.8 Počiatkové experimenty

Na obr. 7.17 je vyobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$ , bez napät'ového obmedzenia. Hodnota konečného vybíjacieho napätia bola stanovená na hodnotu  $1,6 \text{ V}$ .

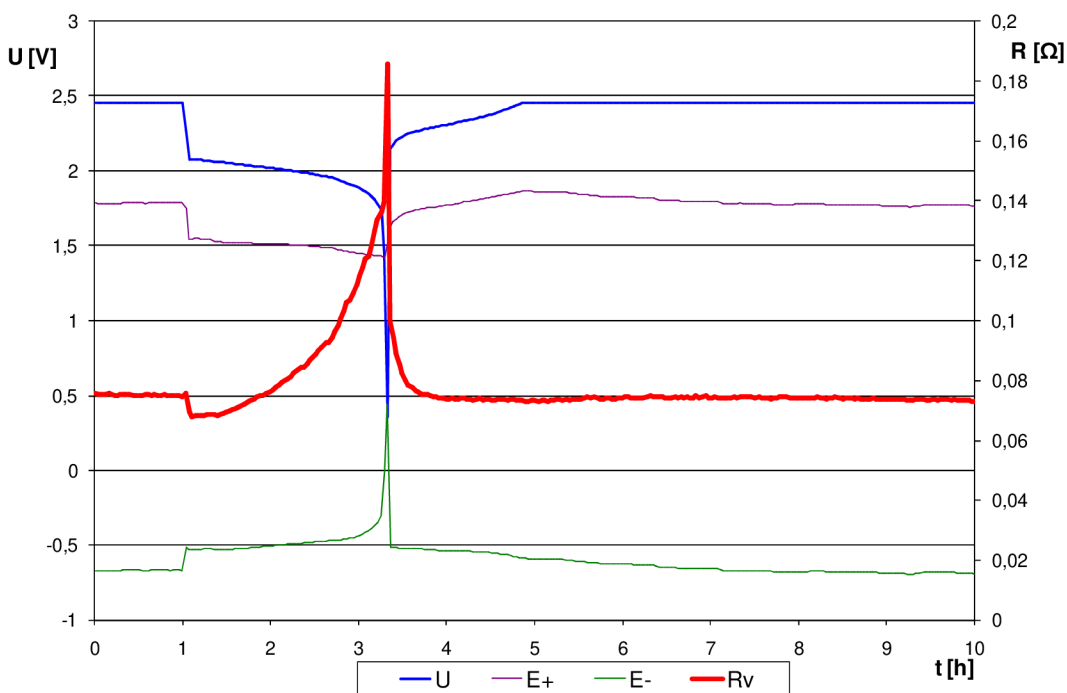
Z grafu je zrejmé, že v priebehu vybíjania prudko exponenciálne vzrastá hodnota vnútorného odporu akumulátora  $R_v$ , ktorá je najvyššia v závere vybíjania. V tejto fáze dochádza k vzniku síranov olovnatých, ktoré izolujú aktívnu hmotu. Taktiež je možné pozorovať, ktorá elektróda to spôsobuje primárne. Jedná sa o zápornú elektródu  $E-$ , ktorá je zároveň limitujúca. Pri tejto elektróde dochádza k najväčšej zmene potenciálu počas vybíjania.

Na začiatku nabíjania dochádza k prudkému poklesu  $R_v$ . Hodnota vnútorného odporu sa pri procese nabíjania ustáli na hodnote  $R_v = 0,068 \Omega$ .



Obr. 7.17: Vybíjacia a nabíjacia charakteristika oloveného akumulátoru

Podobné priebehy je možné vidieť i na obr.7.18. Vybíjanie článku prebieha pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  a nabíjanie s prúdom  $I = 0,2 \text{ A}$  a napäťovým obmedzením 2,45 V. V grafe je vidno rozdiel v počiatočnom poklese  $R_v$  na začiatku vybíjania. Nie je zrejmé prečo k tomuto javu dochádza. Možnou príčinou je použitie rýchleho zdroja, ktorý sa snaží pri režime nabíjania na konštantnom napätí vyhladzovať, resp. obmedzovať striedavý signál.



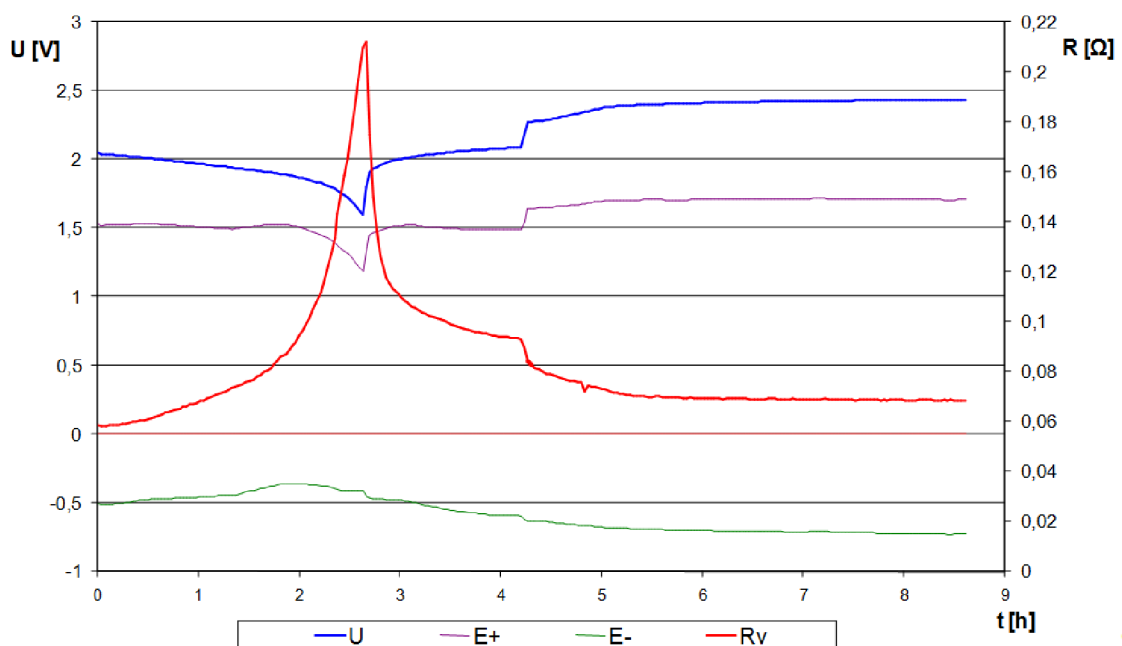
Obr. 7.18: Vybíjacia a nabíjacia charakteristika experimentálneho článku

Obr. 7.19 popisuje závislosť striedavého napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie, státie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  s napäťovým obmedzením  $U = 2,45 \text{ V}$ .

Je vidno, že počas vybíjania prudko exponenciálne vzrastá hodnota vnútorného odporu akumulátora  $R_v$ . V závere vybíjania je ako aj u predošlých grafov najvyššia.

Pri stání, rovnako ako pri nabíjaní prudko klesne  $R_v$ . Je to spôsobené síranmi, ktoré sa vytvoria v závere vybíjania a pri odpojení nabíjacieho prúdu sa zase rozpúšťajú do elektrolytu.

Na začiatku nabíjania je vidno pokles  $R_v$  spôsobený ďalším rozpúšťaním síranu olovnatého v aktívnych hmotách elektród.



Obr. 7.19: Vybíjacia a nabíjacia charakteristika experimentálneho článku

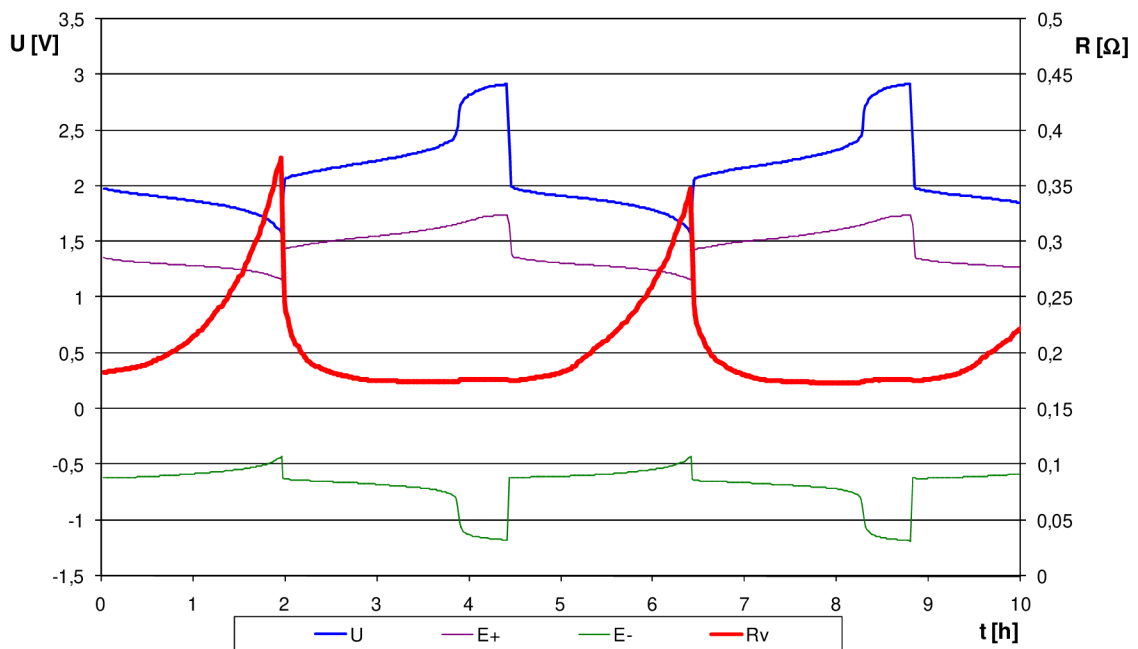
## 7.9 Grafické znázornenie vnútorného odporu pre rôzne veľkosti amplitúd striedavého prúdu

V nasledujúcich grafoch je vidno, že bol článok podrobený niekoľkým experimentom nabíjania a vybíjania s konštantným prúdom  $0,2 \text{ A}$ . Článok bol nabíjaný na 150 % svojej kapacity. Bolo skúmané správanie sa vnútorného odporu v závislosti od zvolenej amplitúdy striedavého signálu. Cieľom bolo zistiť pri akej amplitúde striedavého prúdu bude možné správne odčítať hodnotu vnútorného odporu. Ideálnym stavom je čo najnižšia amplitúda striedavého prúdu, kedy nedochádza k prílišným energetickým a tepelným stratám.

Na obrázku 7.20 je uvedená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie

a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napäťového obmedzenia. Na generátore je nastavený sínusový signál s efektívnou hodnotou striedavého prúdu  $I = 330 \text{ mA}$  pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 242 \text{ mA}$ . Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 92,1 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 67,7 \text{ mV}$  pre vybitý stav.

Je vidno, že v začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne  $R_v = 0,17 \Omega$ . Ďalej v priebehu vybíjania nastane exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 0,36 \Omega$ .



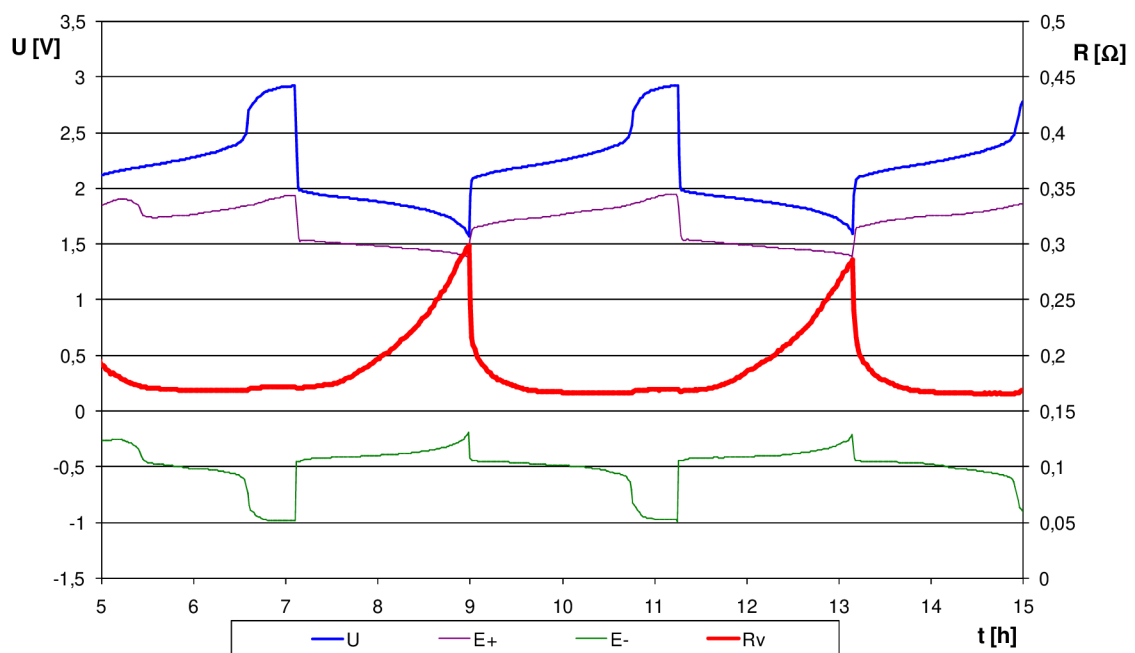
Obr. 7.20: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 330 \text{ mA}$

Po začatí procesu nabíjania  $R_v$  prudko klesne a pozvoľna prejde do ustálenej hodnoty, kedy je opäť  $R_v = 0,17 \Omega$ . Tento rýchly pokles je spôsobený štiepením nevodivého síranu olovnatého v aktívnej hmote. V oblasti nad  $2,47 \text{ V}$  sa okrem síranu začne rozkladať aj voda na vodík a kyslík a akumulátor začne plynovať. V tomto pásme je jemne zreteľný nárast  $R_v$ . Po zväčšení napätia z  $2,7$  na  $2,8 \text{ V}$  sa privádzaná energia spotrebúva len na rozklad vody, akumulátor začne intenzívne plynovať a jeho napätie sa už nezväčšuje. Limitujúca elektróda je v tomto prípade záporná. Je to spôsobené tým, že pri vybíjaní dochádza k väčšej zmene potenciálu na zápornej elektróde než na kladnej.

V ďalšom priebehu na obrázku 7.21 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E_+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E_-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napäťového obmedzenia. Pri meraní sme použili sínusový signál s približne polovičnou amplitúdou striedavého prúdu oproti predchádzajúcemu grafu.  $I = 161,4 \text{ mA}$  pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 131,4 \text{ mA}$ . Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 45,2 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 36,8 \text{ mV}$  pre vybitý stav.

Je vidno, že v začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne platí  $R_v = 0,17 \Omega$ . Ďalej v priebehu vybíjania nastane exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 0,30 \Omega$ . Je možné konštatovať, že maximálna hodnota vnútorného odporu klesla oproti predchádzajúcemu priebehu o  $0,06 \Omega$ . Záporná elektróda je vyťažovaná viac (je viac limitujúca) a kladná elektróda menej (menej limitujúca) v porovnaní s obr. 7.20.

Pri nabíjaní sa hodnota vnútorného odporu ustáli na hodnote  $0,17 \Omega$  a pri konci nabíjania je vidno podobné zväčšenie sa odporu ako to bolo u obr. 7.20. Toto jemné zvlnenie je súvisí s plynovaním. Plyny sú oveľa menej vodivé ako okolitý elektrolyt a majú charakter izolantov.

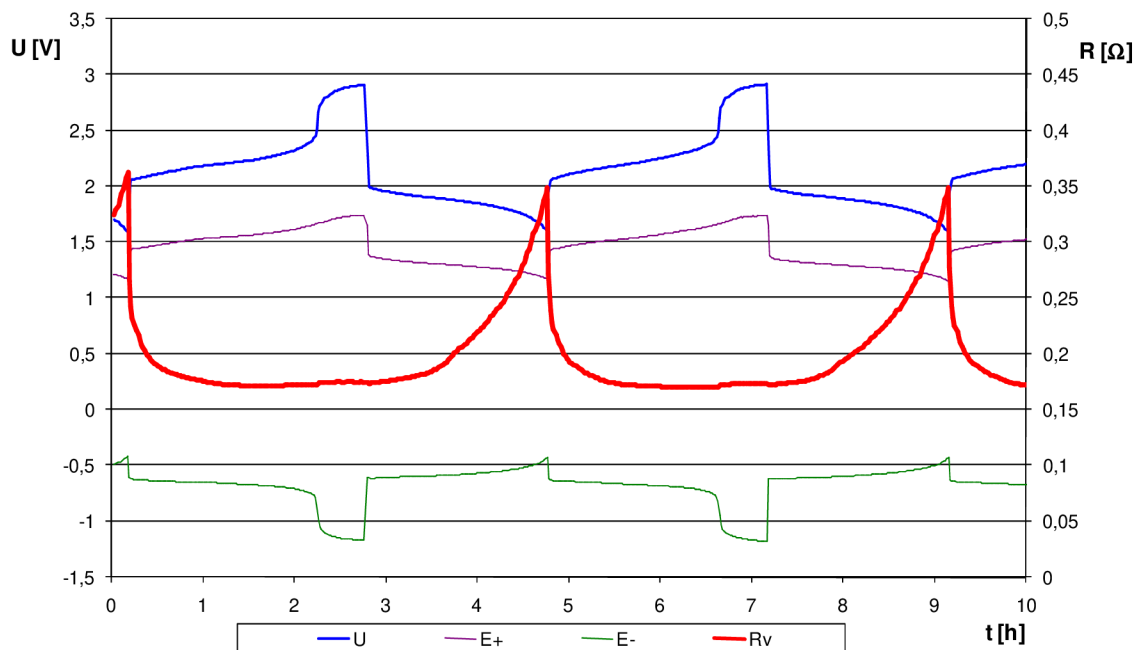


Obr. 7.21: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 161 \text{ mA}$

Na obrázku 7.22 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napäťového obmedzenia. Na generátore je nastavený sínusový signál s amplitúdou striedavého prúdu  $I = 66,1 \text{ mA}$  pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 48,2 \text{ mA}$ . Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 18 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 13 \text{ mV}$  pre vybitý stav.

Je vidno, že v začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne platí  $R_v = 0,17 \Omega$ . Ďalej v priebehu vybíjania nastane prudký exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 0,3 \Omega$ . Je možné konštatovať, že maximálna hodnota vnútorného odporu vzrástla oproti predchádzajúcemu priebehu o  $0,05 \Omega$ .

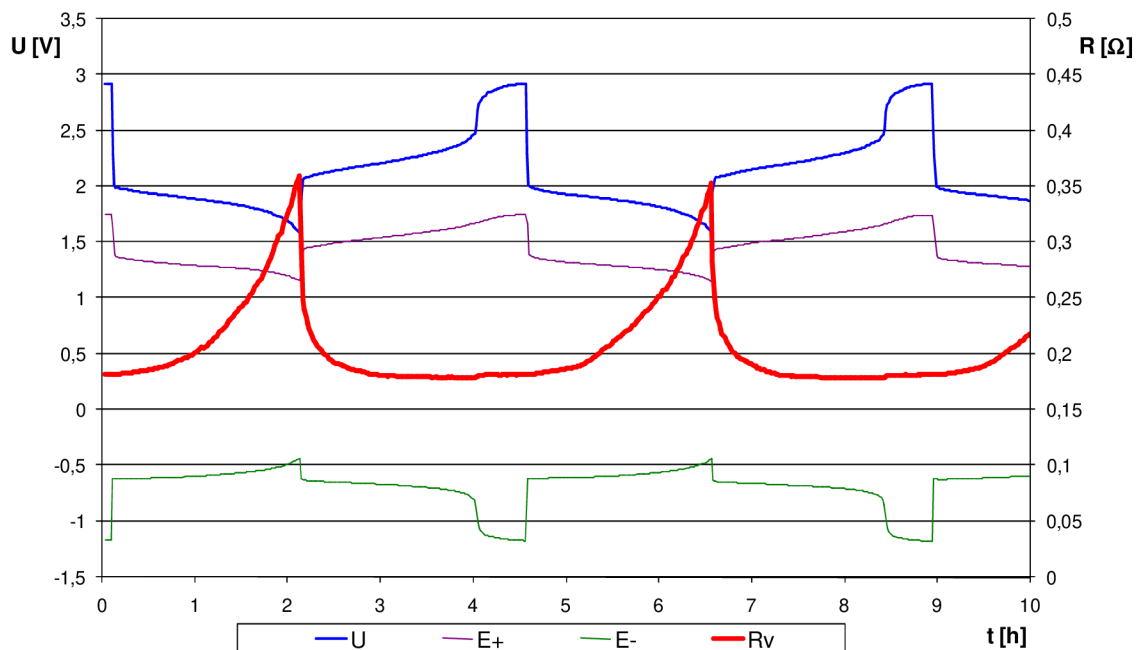
Z uvedeného vyplýva, že priebehy na obr. 7.20 a 7.22 sú na seba veľmi podobné. Vnútorný odpor implikuje, že elektródy na týchto priebehoch sú rovnako vyťažované.



Obr. 7.22: Sínusový signál,  $f=2$  kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 66,1$  mA

Na obrázku 7.23 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2$  A bez napätového obmedzenia. Na generátore je nastavený sínusový signál s amplitúdou striedavého prúdu  $I = 16$  mA pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 13$  mA. Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 4,6$  mV pre nabitý stav a  $U_R = 3,6$  mV pre vybitý stav.

Je vidno, že v začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne platí  $R_v = 0,18 \Omega$ . Ďalej v priebehu vybíjania nastane exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 0,35 \Omega$ . Je možné konštatovať, že maximálna hodnota vnútorného odporu vzrástla proti predchádzajúcemu priebehu o  $0,05 \Omega$ .



Obr. 7.23: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 16 \text{ mA}$

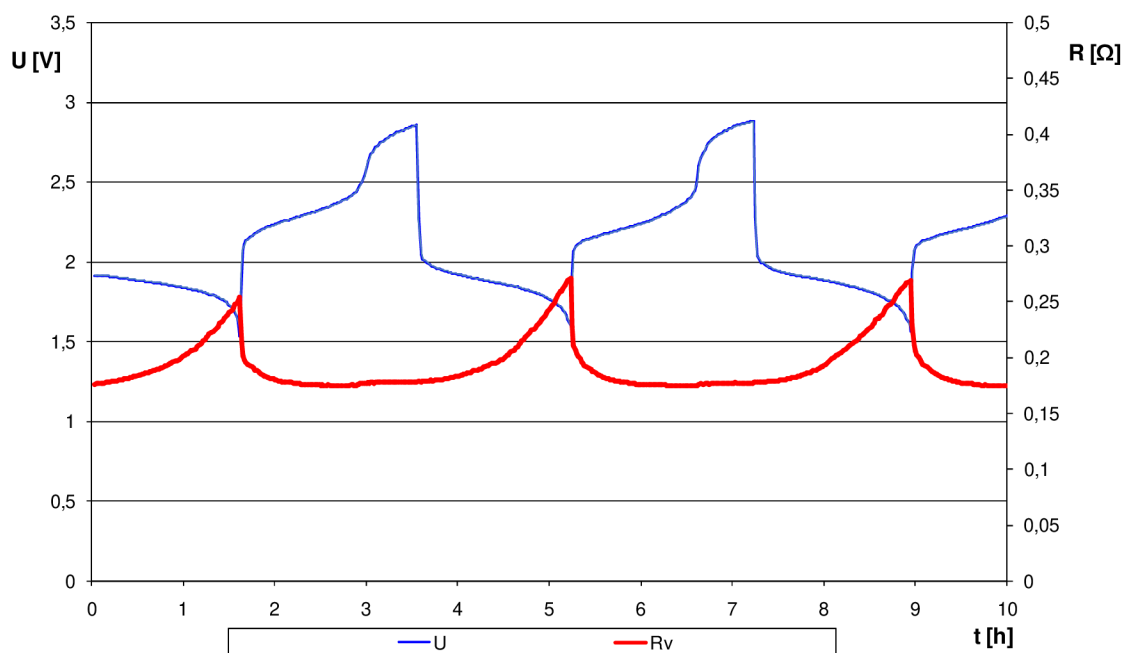
Na obrázku 7.24 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$  a závislosť vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napät'ového obmedzenia. Potenciál kladnej elektródy  $E_+$  a potenciál zápornej elektródy  $E_-$  sa z dôvodu chybného merania nepodarilo vyhodnotiť.

Na generátore je nastavený sínusový signál s amplitúdou striedavého prúdu  $I = 6,8 \text{ mA}$  pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 5,7 \text{ mA}$ . Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 1,9 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 1,6 \text{ mV}$  pre vybitý stav.

Je vidno, že v začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne platí  $R_v = 0,17 \text{ } \Omega$ . Ďalej v priebehu vybíjania nastane prudký exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 0,27 \text{ } \Omega$ . Maximálna hodnota vnútorného odporu klesla oproti predchádzajúcemu priebehu o  $0,08 \text{ } \Omega$ .

Z uvedeného grafu je možné konštatovať, že sa na priebehu vnútorného odporu neobjavuje ešte žiadna chyba. Ide teda o optimálny záznam bez chýb.





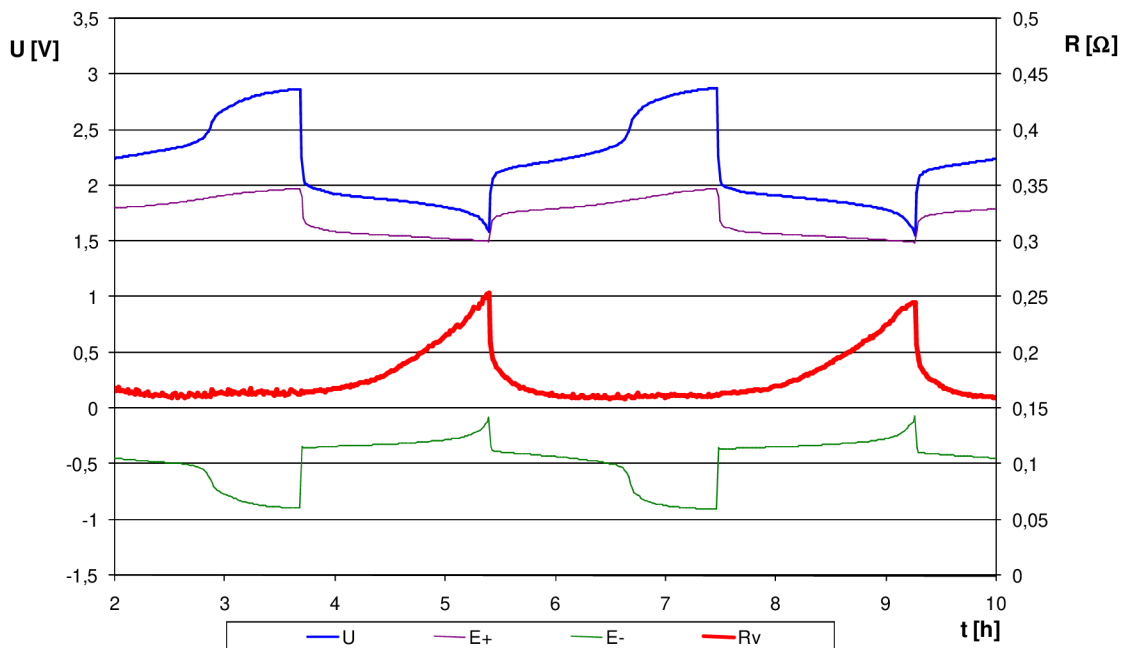
Obr. 7.24: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 6,8 \text{ mA}$

Na obrázku 7.25 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napäťového obmedzenia. Na generátore je nastavený sínusový signál s amplitúdou striedavého prúdu  $I = 3,6 \text{ mA}$  pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 2,9 \text{ mA}$ . Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 1 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 0,8 \text{ mV}$  pre vybitý stav.

Je vidno, že v začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne platí  $R_v = 0,16 \Omega$ . Ďalej v priebehu vybíjania nastane pozvolný exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 0,25 \Omega$ . Maximálna hodnota vnútorného odporu klesla oproti predchádzajúcemu priebehu o  $0,02 \Omega$ .

Pri nabíjaní článku sa po prvý krát prejavili rušivé prvky v signále. Je to zrejme z nabíjacej časti, kedy je hodnota  $R_v$  najnižšia. V tejto oblasti sú najnižšie úbytky napätí a s tým súvisí aj väčšia chyba pri meraní  $R_v$ .

Pri tejto amplitúde striedavého prúdu  $I = 3,6 \text{ mA}$  môžeme teda hovoriť o medzipoužitelnosti. Je ju možné použiť v krajnom prípade, ale už vyhodnocujeme vnútorný odpor s rizikami.



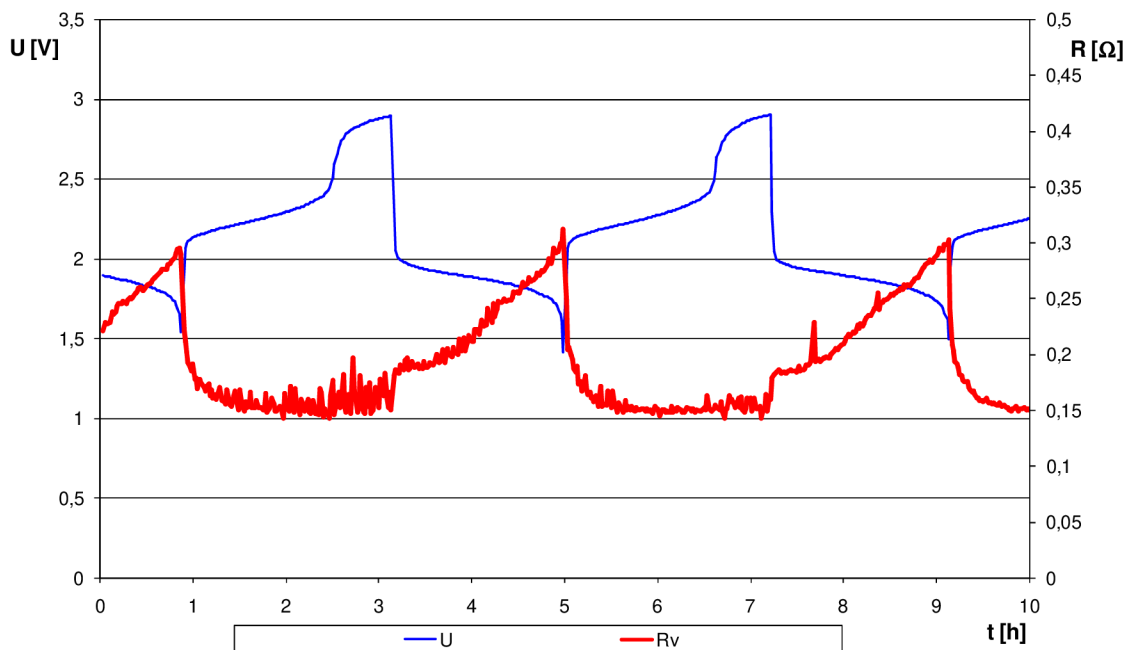
Obr. 7.25: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 3,6 \text{ mA}$

Na obrázku 7.26 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napäťového obmedzenia. Potenciál kladnej elektródy  $E+$  a potenciál zápornej elektródy  $E-$  sa z dôvodu chybného merania nepodarilo vyhodnotiť

Na generátore je nastavený sínusový signál s amplitúdou striedavého prúdu  $I = 1,73 \text{ mA}$  pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 1,49 \text{ mA}$ . Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 0,484 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 0,418 \text{ mV}$  pre vybitý stav.

Je vidno, že v začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne platí  $R_v = 0,15 \Omega$ . Ďalej v priebehu vybíjania nastane prudký exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 0,30 \Omega$ . Je možné konštatovať, že maximálna hodnota vnútorného odporu stúpla oproti predchádzajúcemu priebehu o  $0,05 \Omega$ .

Pri nabíjaní článku je vidno, že priebeh  $R_v$  je už výraznejšie zašumený resp. nepravidelne kolíše okolo danej hodnoty  $R_v$ . V oblasti vybíjania je priebeh  $R_v$  o niečo menej skreslený. Opäť majú tieto priebehy súvis s nízkou amplitúdou striedavého prúdu. Meranie s touto amplitúdou je teda už nevhodné.

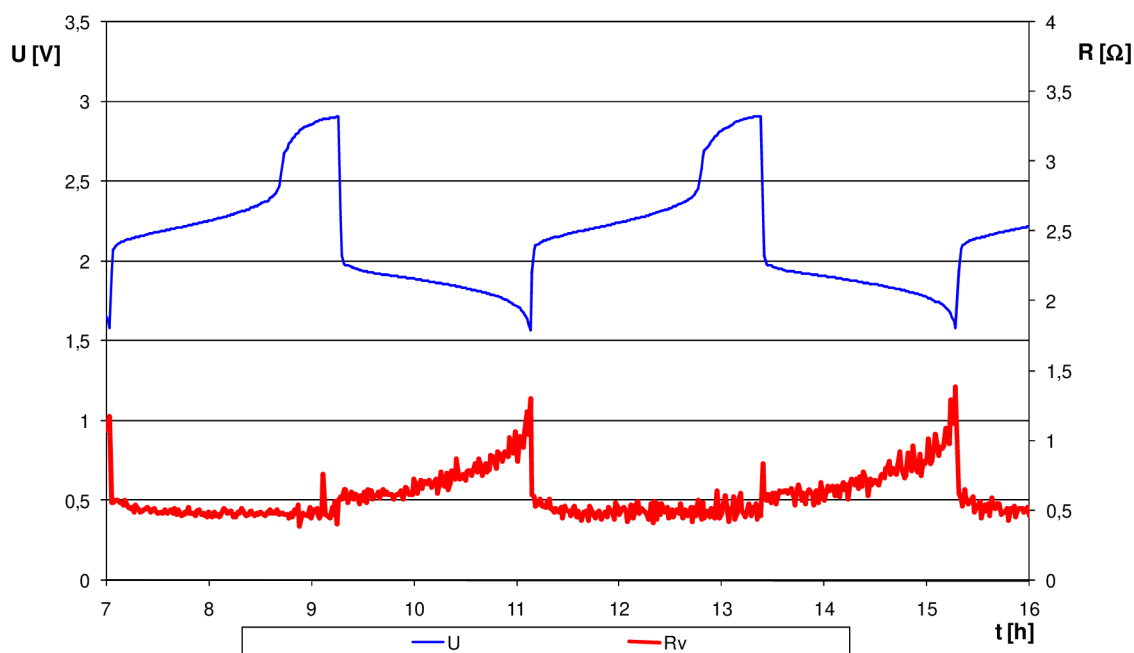


Obr. 7.26: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 1,73 \text{ mA}$

Na obrázku 7.26 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napäťového obmedzenia. Potenciál kladnej elektródy  $E+$  a potenciál zápornej elektródy  $E-$  sa z dôvodu chybného merania nepodarilo vyhodnotiť.

Na generátore je nastavený sínusový signál s amplitúdou striedavého prúdu  $I = 37,1 \text{ mA}$  pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 0,175 \text{ mA}$ . Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 10,4 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 0,049 \text{ mV}$  pre vybitý stav.

Je vidno, že v začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne platí  $R_v = 0,5 \text{ } \Omega$ . Táto hodnota sa značne líši od predchádzajúcich hodnôt. Systém sa teda chová neštandardne. Ďalej v priebehu vybíjania nastane exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 1,4 \text{ } \Omega$ , čo je tiež netypická hodnota v rámci tohto merania. Je možné konštatovať, že maximálna hodnota vnútorného odporu stúpla oproti predchádzajúcemu priebehu o  $1,1 \text{ } \Omega$ . V tomto prípade je signál  $R_v$  výrazne zašumený v celej oblasti nabíjania a vybíjania článku. Vyhodnocujeme výrazne nepresné výsledky vnútorného odporu.

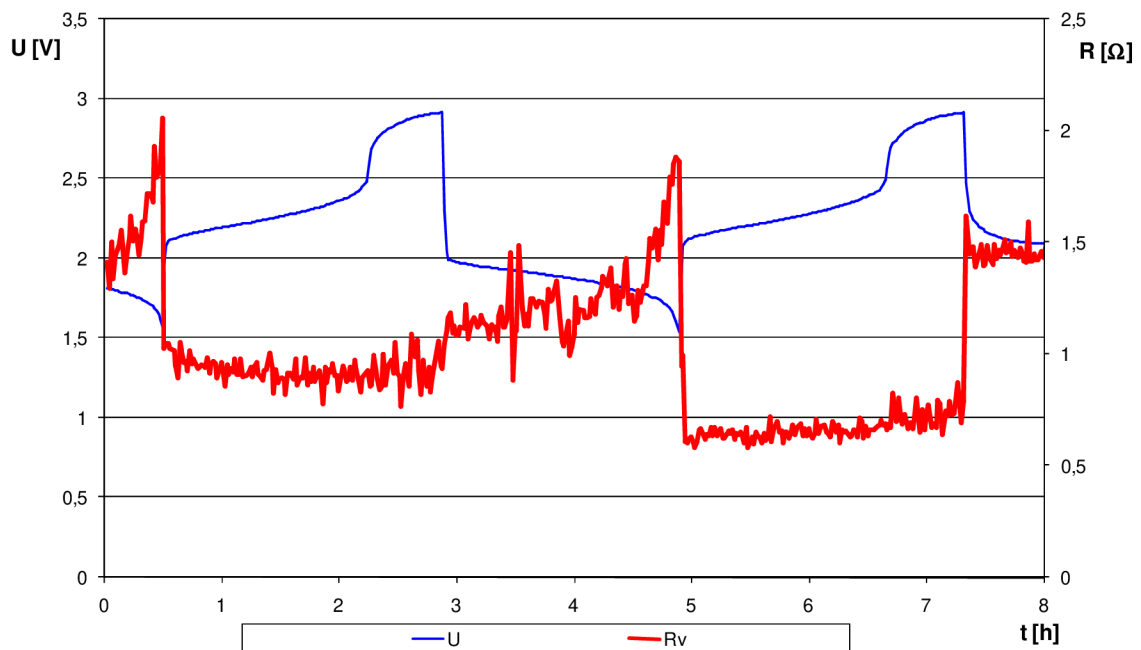


Obr. 7.27: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 37,1 \text{ mA}$

Na obrázku 7.28 je zobrazená závislosť jednosmerného napätia  $U$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napäťového obmedzenia. Potenciál kladnej elektródy  $E+$ , a potenciál zápornej elektródy  $E-$  sa nám opäť nepodarilo zmerať.

Na generátore je nastavený sínusový signál s efektívnou hodnotou striedavého prúdu  $I = 0,211 \text{ mA}$  pre nabitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 0,1 \text{ mA}$ . Platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 0,059 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 0,028 \text{ mV}$  pre vybitý stav.

V začiatku vybíjania článku je hodnota vnútorného odporu najnižšia, približne platí  $R_v = 0,5 \Omega$ . Ďalej v priebehu vybíjania nastane exponenciálny rast vnútorného odporu. Na konci vybíjania je hodnota  $R_v$  maximálna. Pohybuje sa približne v hodnotách  $R_v = 2 \Omega$ . Je možné konštatovať, že celý priebeh vnútorného odporu vzrástol a maximálna hodnota  $R_v$  stúpla oproti predchádzajúcemu priebehu o  $0,6 \Omega$ . Podobne i v tomto prípade vyhodnocujeme výrazne zlé výsledky vnútorného odporu, ktoré nezodpovedajú skutočnosti.



Obr. 7.28: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$  efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 0,211 \text{ mA}$

## 7.10 Grafické znázornenie vnútorného odporu pre signál sínus, square a triangle

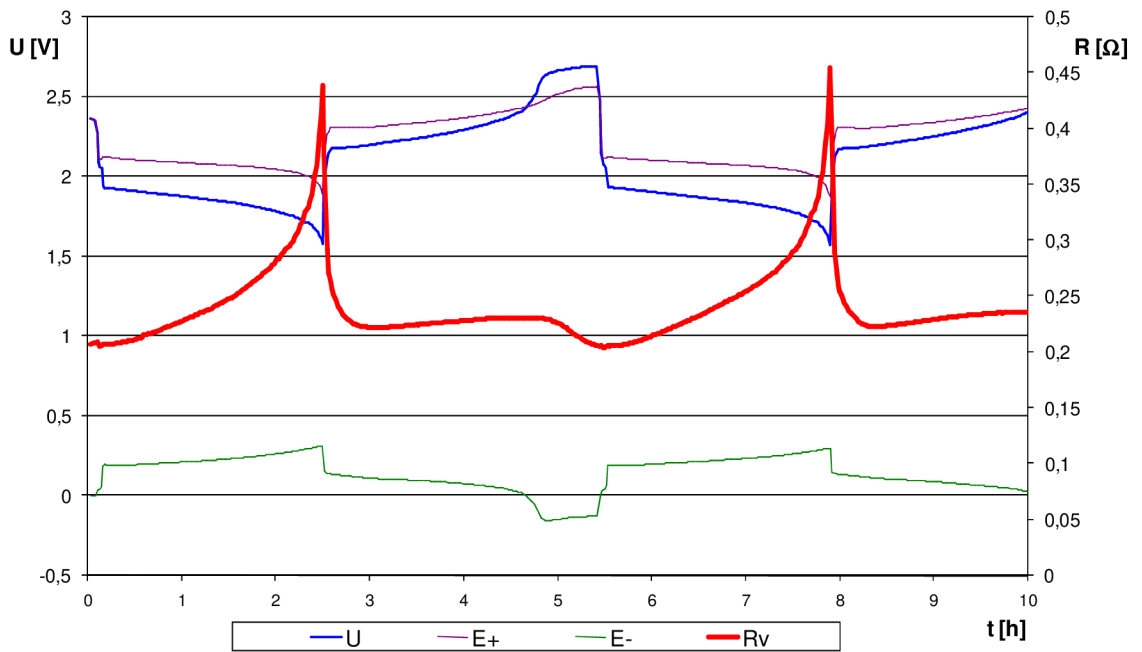
Súčasťou tejto práce bolo skúmanie chovania vnútorného odporu experimentálneho článku i pre signál tvaru square a triangle. Z dôvodu straty kapacity predošlého článku bol v tejto časti merania použitý nanovo zostrojený experimentálny článok rovnakej konštrukcie. Článok sme skúmali pri optimálnej frekvencii 2 kHz.

Na obr. 7.29, 7.30 a 7.31 je pre meranie použitý signál sínus, square a triangle. Striedavý prúd pre nabitý stav  $I = 218 \text{ mA}$ . Pre toto grafické zobrazenie platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 61,2 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 44,1 \text{ mV}$  pre vybitý stav. Striedavý prúd pre vybitý stav  $I = 157,5 \text{ mA}$ .

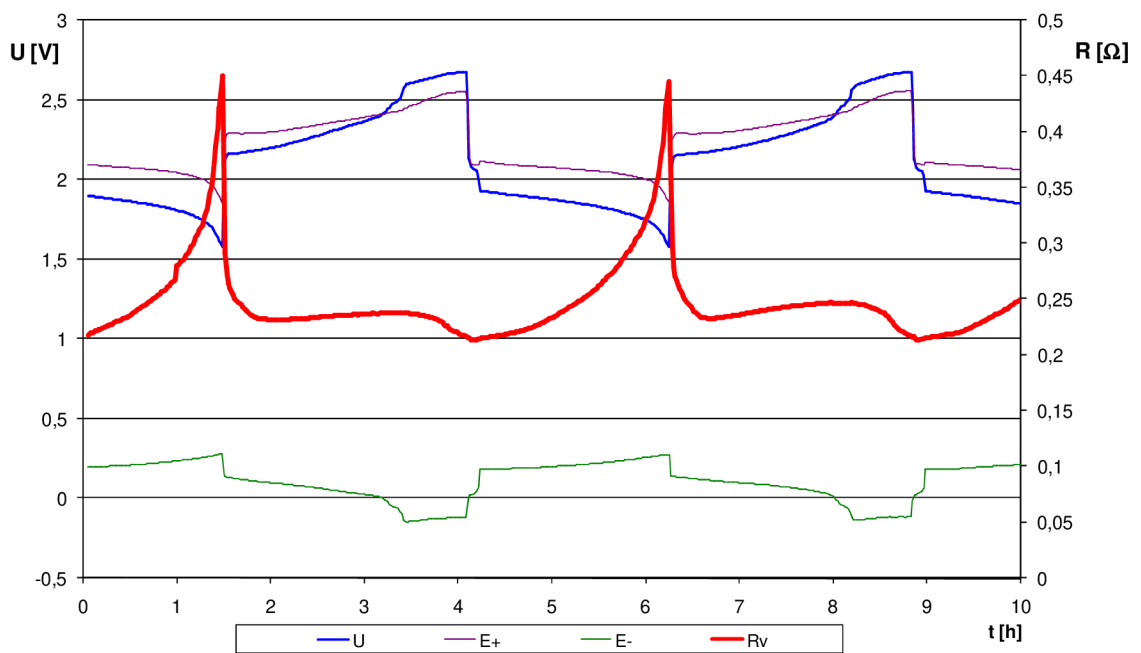
Začiatkom vybíjania článku je hodnota  $R_v = 0,22 \Omega$ . S pokračovaním vybíjania exponenciálne rastie a pri konci vybíjania dosiahne svoju maximálnu hodnotu  $R_v = 0,45 \Omega$ .

Po začatí nabíjania sa z maximálnej hodnoty  $R_v$  prudko dostane na približne  $0,23 \Omega$  a pomaly rastie až na hodnotu  $R_v = 0,25 \Omega$ . Tento jemný nárast  $R_v$  je pravdepodobne spôsobený kyslíkom, ktorý vzniká plynovaním kladnej elektródy. V závere nabíjania je vidno menší pokles vnútorného odporu. Dôvod tohto javu nie je zatiaľ známy, jedno z možných vysvetlení je, že má súvislosť so začatím plynovania zápornej elektródy, kedy sa tvorí vodík.

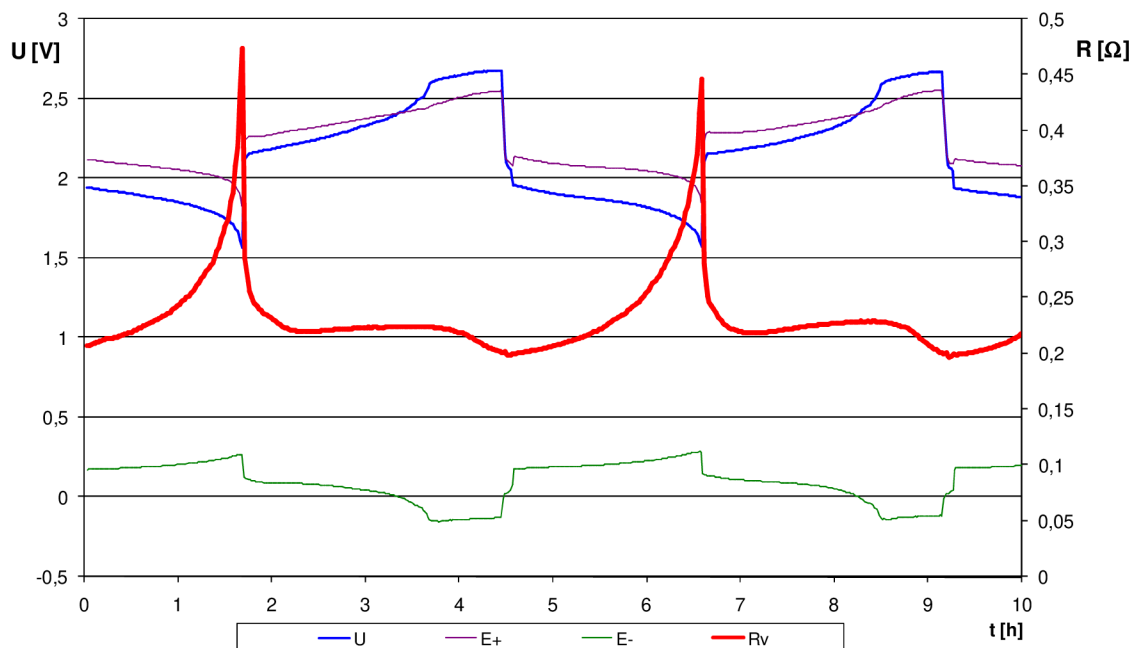
Bolo zistené, že priebehy vnútorného odporu sú pre všetky tvary signálu rovnaké. Nie je medzi nimi žiadny výrazný rozdiel.



Obr. 7.29: Sínusový signál,  $f = 2$  kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 218$  mA



Obr. 7.30: Square signál,  $f = 2$  kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 218$  mA



Obr. 7.31: Triangle signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 218 \text{ mA}$

## 7.11 Grafické znázornenie vnútorného odporu pre rôzne hodnoty frekvencie na článku

V tejto kapitole je popísané správanie sa experimentálneho článku pri rôznych veľkostiach frekvencie. Článok sme podrobili meraniu od nízkych frekvencií (50 Hz) až po 20 kHz.

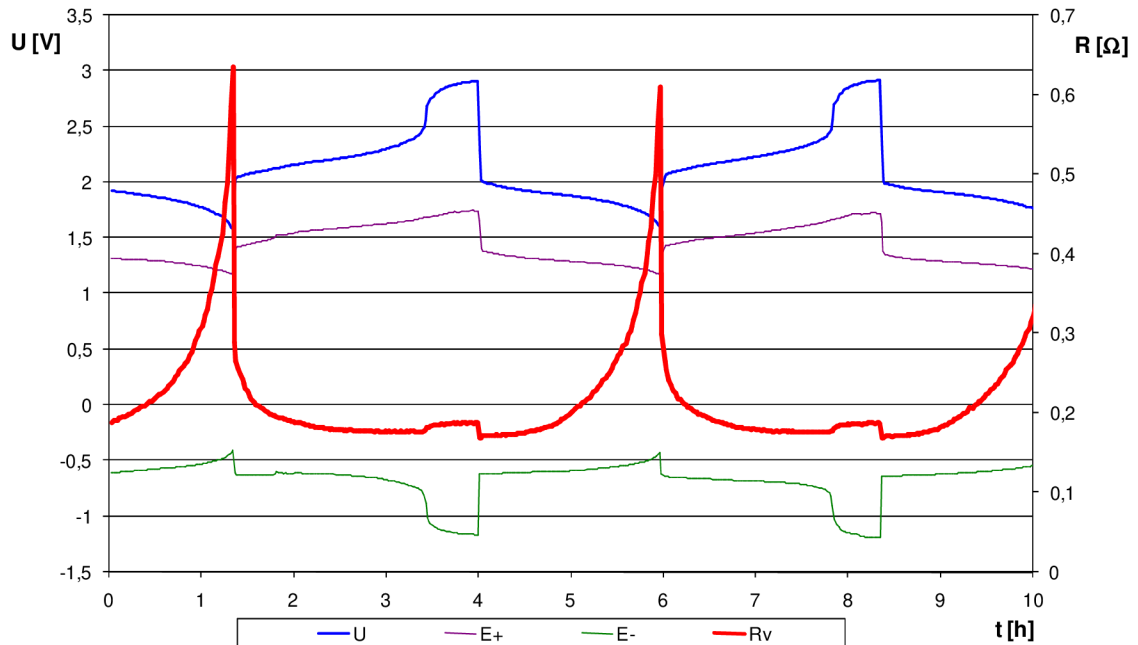
Na obr. 7.32 sme pracovali s frekvenciou sínusového signálu 50 Hz. Je vidno závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $R_v$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napäťového obmedzenia.

Priebeh vnútorného odporu je podobný s predchádzajúcimi experimentmi. Na rozdiel od iných experimentov sú hodnoty  $R_v$  pri nabíjaní a vybíjaní vyššie než pri frekvencii 2 kHz, čo je zrejmé z frekvenčnej analýzy článku na obr. 7.13, kedy je vidno, že hodnota reálnej zložky vnútorného odporu pri nízkych frekvenciách je o niečo väčšia. Meranie vnútorného odporu pri tomto meraní ovplyvňujú kapacitné zložky.

V závere vybíjania je hodnota  $R_v = 0,62 \text{ } \Omega$ . So začiatkom nabíjania prudko klesne a zotrváva na hodnote  $R_v = 0,18 \text{ } \Omega$ . So zvýšením jednosmerného napätia z hodnoty približne 2,5V na 2,8 V súvisí aj mierny nárast  $R_v$ , ktorý je spôsobený plynovaním elektród.

Pre toto grafické zobrazenie platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 10 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 9 \text{ mV}$  pre vybitý stav. Striedavý prúd pre nabitý stav  $I = 36 \text{ mA}$  a pre

vybitý stav  $I = 32 \text{ mA}$ . Dôvodom, prečo je striedavý signál tak malý pri frekvencii 50 Hz je fakt, že pri takto nízkych frekvenciách ho NF zosilňovač už nedokáže dostatočne zosilniť.

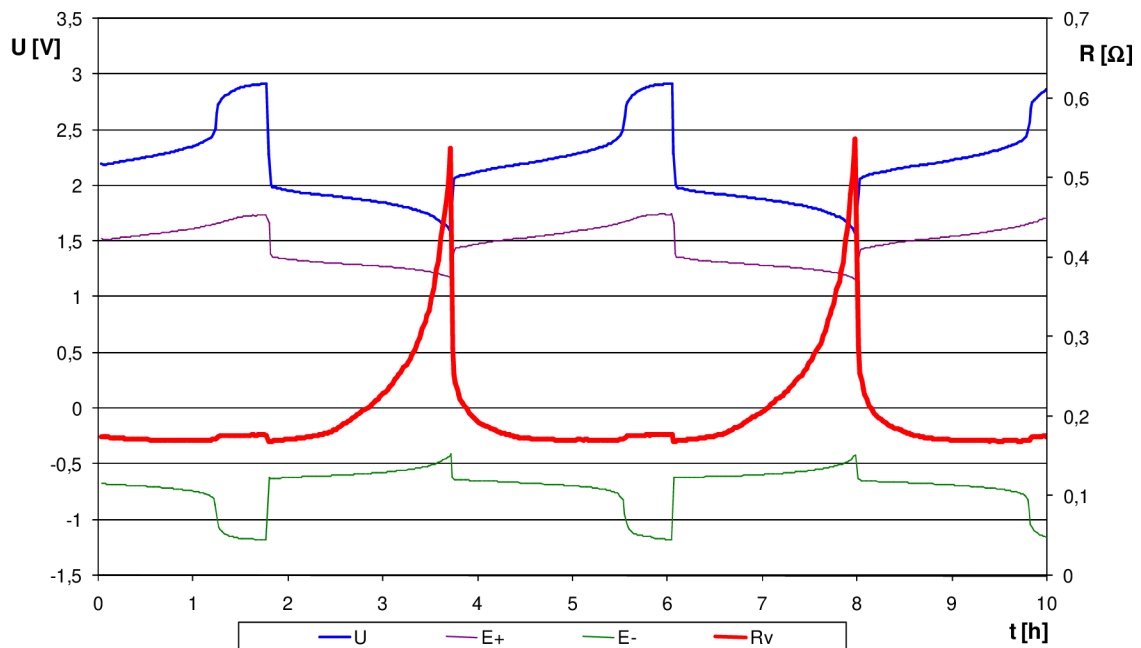


Obr. 7.32: Sínusový signál,  $f = 50 \text{ Hz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 36 \text{ mA}$

Pre frekvenciu sínusového signálu  $f = 200 \text{ Hz}$  je uvedená na obr. 7.33 závislosť jednosmerného napätia  $U$ , potenciálu kladnej elektródy  $E+$ , potenciálu zápornej elektródy  $E-$ , vnútorného odporu  $Rv$  pre vybíjanie a nabíjanie článku pri konštantnom prúde  $I = 0,2 \text{ A}$  bez napät'ového obmedzenia. Pre toto grafické zobrazenie platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 30 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 21 \text{ mV}$  pre vybitý stav. Striedavý prúd pre nabitý stav  $I = 107 \text{ mA}$  a pre vybitý stav  $I = 78 \text{ mA}$ .

V celom meranom rozsahu bol zistený menší vnútorný odpor ako pri obr. 7.32. Jeho maximum je v okolí bodu  $0,55 \text{ } \Omega$ . Je teda možné pozorovať, že maximálna hodnota  $Rv$  klesla o  $0,07 \text{ } \Omega$  oproti predošlému priebehu. Stále prevládajú kapacitné zložky, ktoré bránia presnému meraniu  $Rv$ . Pri hodnote jednosmerného napätia  $2,5$  až  $2,8 \text{ V}$  je možné spozorovať nárast  $Rv$ , ale už v nižších úrovniach oproti predošlému priebehu.



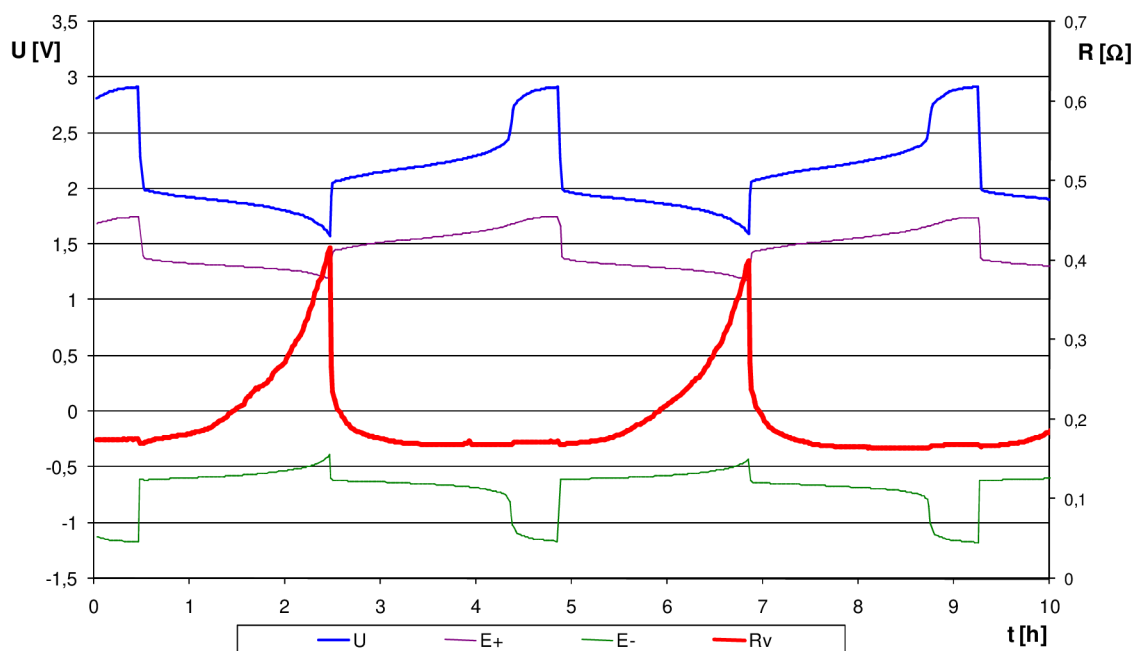


Obr. 7.33: Sínusový signál,  $f = 200$  Hz, efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 107$  mA

Na obrázku 7.34 sa dostávame do frekvenčného pásma striedavého signálu 1 kHz, kedy reálna zložka impedancie dosahuje minimálnych hodnôt a imaginárna zložka impedancie sa blíži hodnotám nulovým

Hodnota  $R_v$  pri konci nabíjania dosahuje  $0,4 \Omega$ , čo je pokles oproti predošlej použitej frekvencii 200 Hz o  $0,15 \Omega$ . V oblasti nabíjania zotrúva  $R_v$  v hodnotách približne podobných ako v predošlom prípade a to  $R_v = 0,17 \Omega$ . Nárast vnútorného odporu, kedy sa jednosmerné napätie pohybuje od  $2,5$  V až po  $2,8$  V je minimálny. Tento jav má to opäť súvis s plynovaním elektród.

Pre toto grafické zobrazenie platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 45$  mV pre nabitý stav a  $U_R = 30$  mV pre vybitý stav. Striedavý prúd pre nabitý stav  $I = 161$  mA a pre vybitý stav  $I = 107$  mA.

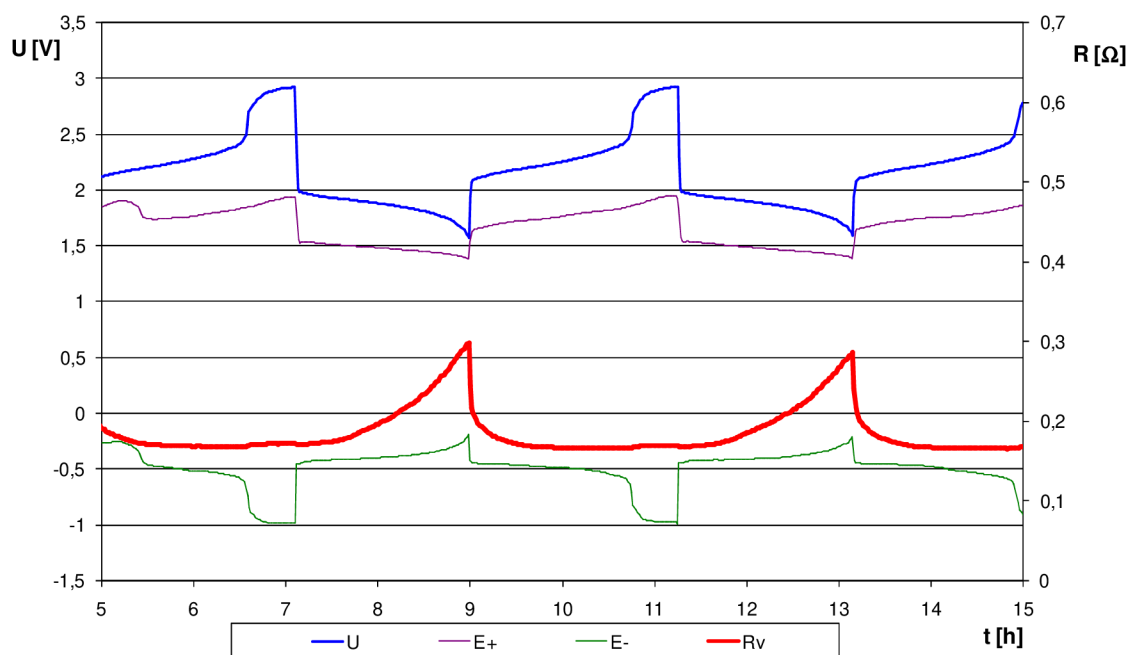


Obr. 7.34: Sínusový signál,  $f = 1$  kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 161$  mA

Pre obrázok 7.35 platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 45,2$  mV pre nabitý stav a  $U_R = 36,8$  mV pre vybitý stav. Striedavý prúd pre nabitý stav  $I = 161,4$  mA a pre vybitý stav  $I = 131,4$  mA. Maximum vnútorného odporu je na konci vybíjania, kedy  $R_v = 0,28 \Omega$  a minimum ( $R_v = 0,17 \Omega$ ) je pri priebehu nabíjania článku. Oproti signálu s frekvenciou 1 kHz klesol  $R_v$  o  $0,12 \Omega$ .

Limitujúcou elektródou je v tomto prípade záporná elektróda, pretože je u nej zrejmy najväčší rozdiel v zmene potenciálu. O niečo menej oproti zápornej elektróde je vyťažovaná kladná elektróda

Pri frekvencii  $f = 2$  kHz a amplitúde striedavého signálu  $I = 161,4$  mA sme dosiahli optimum, kedy je hodnota vnútorného odporu vyhodnocovaná správne. Vyplýva to z frekvenčnej analýzy článku, kedy je reálna časť impedancie minimálna a imaginárna časť impedancie nulová.

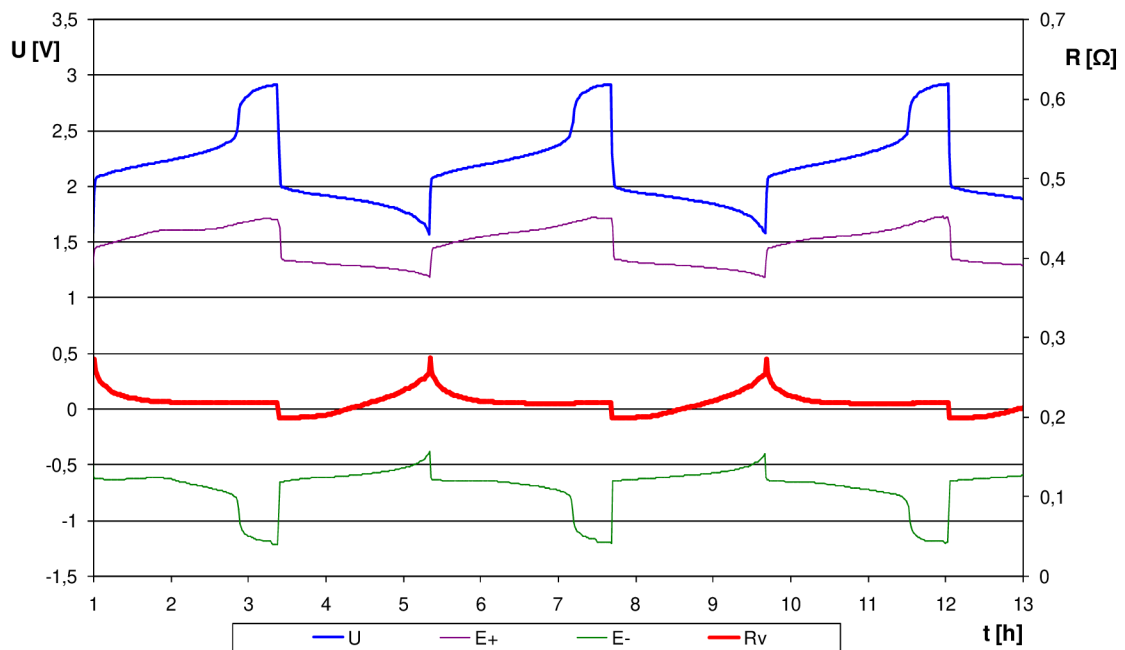


Obr. 7.35: Sínusový signál,  $f = 2 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 161 \text{ mA}$

Pre priebehy na obrázku 7.36 bol použitý striedavý signál s frekvenciou  $10 \text{ kHz}$ . Na prvý pohľad je zrejmé, že hodnoty  $R_v$  sú vyhodnocované nesprávne. Pri meraní impedancie článku pri tejto frekvencii sa zjavne uplatňuje indukčná zložka ako je vidno na obr. 7.13.

Ak sledujeme priebeh  $R_v$ , tak začiatkom vybíjania článku je  $R_v = 0,2 \Omega$  a na konci vybíjania je  $R_v = 0,25 \Omega$ . Pri nabíjaní je hodnota vnútorného odporu na začiatku  $R_v = 0,28 \Omega$  a na konci  $R_v = 0,22 \Omega$ . V priebehu nabíjania je zrejmy nárast zmeranej hodnoty  $R_v$  voči vybíjacej časti. Nabíjacie a vybíjacie krivky na seba plynule nenaväzujú, pretože hodnota  $R_v$  sa skokovo zvýšila o cca  $0,02 \Omega$

Pre toto grafické zobrazenie platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 39 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 32 \text{ mV}$  pre vybitý stav. Striedavý prúd pre nabitý stav  $I = 139 \text{ mA}$  a pre vybitý stav  $I = 114 \text{ mA}$ .



Obr. 7.36: Sínusový signál,  $f = 10 \text{ kHz}$ , efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 139 \text{ mA}$

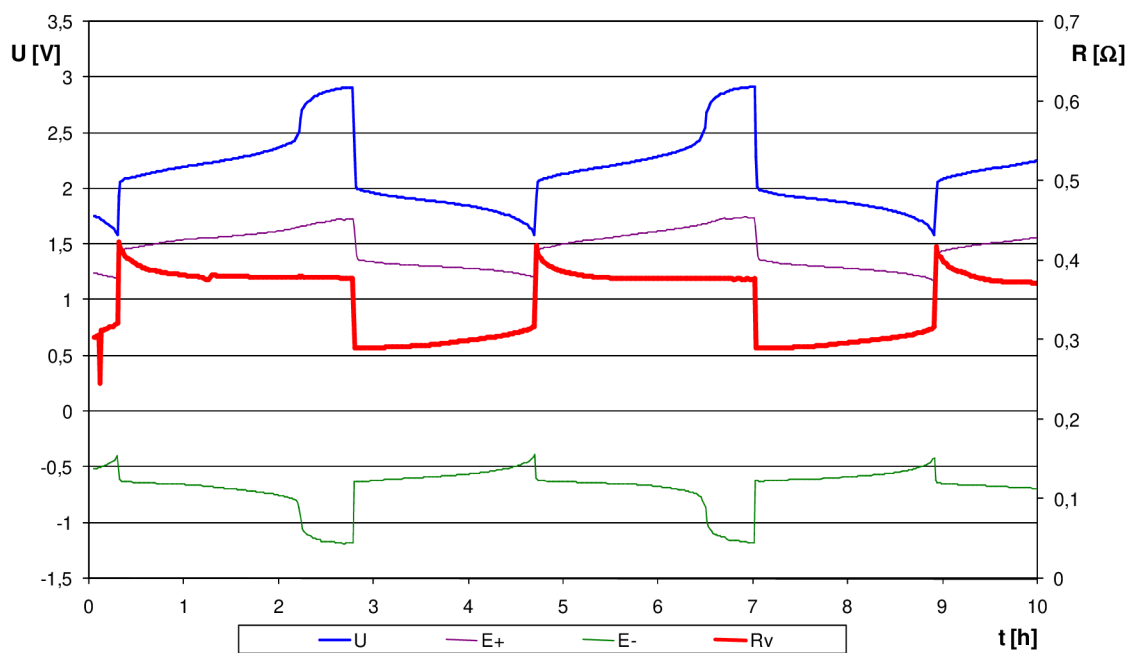
Pri vyšších frekvenciách ako je to na obr. 7.37, kde pracujeme so signálom  $20 \text{ kHz}$  sa priebehy  $R_v$  posúvajú ešte vyššie ako to bolo na obr. 7.36. Pri meraní impedancie článku pri tejto frekvencii sa výrazne uplatňuje indukčná zložka ako je vidno na obr.7.13.

V tomto meraní prišlo k nárastu  $R_v$  vo vybíjacej aj nabíjacej časti. V priebehu nabíjania je zrejмый nárast zmeranej hodnoty  $R_v$  voči vybíjacej časti. Hodnota  $R_v$  sa skokovo zvýšila o  $0,1 \Omega$ .

Začiatkom vybíjania článku je hodnota  $R_v = 0,28 \Omega$  a pozvoľna rastie na hodnotu  $R_v = 0,32 \Omega$ . Pri nabíjaní je hodnota  $R_v = 0,42 \Omega$  a ustáli sa na hodnote  $R_v = 0,37 \Omega$

Pre toto grafické zobrazenie platí, že striedavé napätie na rezistore  $U_R = 39 \text{ mV}$  pre nabitý stav a  $U_R = 7 \text{ mV}$  pre vybitý stav. Striedavý prúd pre nabitý stav  $I = 139 \text{ mA}$  a pre vybitý stav  $I = 25 \text{ mA}$ .

Obe merania (obr.7.35, obr 7.36) sú nepresné a zaťažené chybou indukčnej zložky



Obr. 7.37: Sínusový signál,  $f = 20$  kHz, efektívna hodnota striedavého prúdu  $I = 139$  mA

## 8 ZÁVER

Diplomová práca pojednáva o metóde merania vnútorného odporu oloveného akumulátora striedavou metódou. V začiatku práce je uvedené prehľadné delenie elektrochemických článkov. Nasleduje rozbor vlastností olovených akumulátorov ako aj popísaný chemický proces pri nabíjaní a vybíjaní akumulátora.

V nasledujúcej podkapitole je podrobne popísaná konštrukcia oloveného akumulátora. Kapitola 3 pojednáva o problematike formovania elektród. Taktiež je spracovaná časť zaoberajúca sa hĺbkou vybitia a vybíjacím prúdom. O negatívnych javoch akumulátorov sa pojednáva v kapitole 5. V ďalšej kapitole bolo popísané meranie článkov akumulátoru, kde bolo spracované všeobecne meranie vnútorného odporu akumulátora a v ďalšej podkapitole bolo spracované meranie vnútorného odporu článku striedavou metódou.

Následne je spracovaná kapitola s praktickým meraním vnútorného odporu článkov. Bolo zostavené pracovisko pre meranie vnútorného odporu striedavou metódou, ktoré bolo doplnené o dôležitý NF zosilňovač. Taktiež boli zhotovené elektródy a experimentálny článok. Článok bol cyklovaný za pomoci softvéru Agilent VEE 8 Pro. Pred praktickou časťou sú uvedené grafické priebehy striedavého prúdu použité pre meranie vnútorného odporu. Bol použitý sínusový, square a triangle signál.

Výskum bol zameraný hlavne na nájdenie optimálnej amplitúdy, frekvencie a tvaru striedavého prúdu pre meranie vnútorného odporu.

V praktickej časti bola spracovaná oblasť merania frekvenčných závislostí impedancie v nabitom a vo vybitom stave. Z frekvenčných závislostí impedancie v nabitom stave vychádza optimálna frekvencia 2 kHz, kde reálna zložka impedancie dosahuje minimálnych hodnôt a reálna je nulových. Vo vybitom sa optimálna frekvencia sa posúva do vyšších hodnôt, konkrétne do oblasti 10 kHz, kde má reálna zložka impedancie minimálne hodnoty a imaginárna má hodnoty v okolí nuly.

Bolo zistené, že optimálna amplitúda striedavého prúdu pre meranie vnútorného odporu je okolo 10 mA. Vnútorný odpor článku je možné merať aj pri nižších amplitúdach, avšak s nepresnosťou, ktorá sa prejavuje hlavne v nabíjacej časti. Je možné použiť i vyššie amplitúdy, ale tým je už zvýšená energetická náročnosť systému a zbytočne vznikajú tepelné straty v článku.

V intervale v okolí 2 kHz boli zistené ideálne frekvenčné podmienky pre meranie  $R_v$ . Pri nižších frekvenciách dochádza k nárastu vnútorného odporu hlavne na konci vybíjania článku. V oblastiach vyšších frekvencií je opäť zrejme zväčšenie  $R_v$  a navyše narastá chyba medzi nabíjacou a vybíjacou časťou.

Tvar signálu nemal vplyv na meranie vnútorného odporu.

# LITERATÚRA

[1] História akumulátorov. [cit. 2011-03-01]. Dostupné z:<http://www.battery.cz/baterie-info>

[2] História akumulátorov [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: [http:// wikipedia.org](http://wikipedia.org).

[3] VANĚK, J., KŘIVÍK, P., NOVÁK, V. *Alternativní zdroje energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 158 stran.

[4] Department of energy USA: Primer on Lead-Acid storage batteries, DOE-HDBK-1084-95 (1995)

[5] Obrázok na stránke:

[http://www.pees.sk/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4&Itemid=14](http://www.pees.sk/index.php?option=com_content&view=article&id=4&Itemid=14)

[6] VLASÁK, Z., Olověné automobilové akumulátory [online], 2002 [cit. 2011-14-12]. Dostupné z [http://www.zvlasak.net/baterie\\_s.pdf](http://www.zvlasak.net/baterie_s.pdf)

[7] Článok na stránke: <http://elektrika.cz/data/clanky/akumulatory>

[8] HAMMERBAUER, J., Olověné akumulátory [online]. Dostupné z

<http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/clanky2/olov.pdf>

[9] Skoro vše o akumulátorech. [online 2008-12-20]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z <http://www.k1400.cz/clanky/radime/konkretne/aku/obecne/akumulatory.pdf>.

[10] Obrázok na stránke:

[http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS6pFXj3Gxne8lXgyCGKPFf8z9tWwoKH DxABQb\\_Gwc5MoVi01WI](http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS6pFXj3Gxne8lXgyCGKPFf8z9tWwoKH DxABQb_Gwc5MoVi01WI)

[11] Obrázok na stránke: <http://www.ellert.info/images/sulplate.jpg>

[12] Vrstvenie elektrolytu. [online], [cit. 2013-04-15]. Dostupné z:

<http://jes.ecsdl.org/content/154/1/A1.abstract>

[13] MACH, M. *Startovací akumulátory*. Brno, 2008. 48s. Bakalářská práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií. VUT Brno. Vedoucí bakalářské práce Vítězslav Hájek.

[14] Produkty JUMO a.s. - měření a regulace [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z <http://www3.jumo.de/pio/toModule.do?page=/home.do&shop=JUMO&prefix=/jumo&country=CZ&language=cs>.

[15] Agilent Technologies, Inc. VEE ProUser's Guide

[16] Výpočty efektivních hodnot signálů. Dostupné z:

<http://masteringelectronicsdesign.com/how-to-derive-the-rms-value-of-a-triangle-waveform/>

[17] Odvodenie efektívnej hodnoty trojuholníkového priebehu. Dostupné z:

<http://www.rfcafe.com/references/electrical/triangle-wave-voltage-conversion.htm>

# ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

<i>A</i>	Amplitúda striedavého signálu
<i>A<sub>m</sub></i>	Maximálna amplitúda striedavého signálu
<i>R<sub>v</sub></i>	Vnútorý odpor
LAN	Local Area Network, lokálna počítačová sieť
USB	Universal Serial Bus, univerzálna sériová zbernica
GPIB	General Purpose Interface Board, univerzálna doska rozhrania
RS-232	Recommended Standard 232, definícia rozhrania sériového portu
NF zosilňovač	Nízkofrekvenčný zosilňovač
AC signál	Striedavý signál
PE	Polyetylén