

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Regenerátor olověných akumulátorů

Radek Ackermann

Bakalářská práce

2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek Ackermann**  
Osobní číslo: **D15186**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**  
Název tématu: **Regenerátor olověných akumulátorů**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Živostnost olověných akumulátorů je ve většině případů ovlivněna jevem známým jako sulfatace. Jedná se nevratný proces způsobující snížení kapacity akumulátoru a zvýšení jeho vnitřního odporu. I když se sulfatace považuje za proces nevratný, existují metody, jak lze sulfataci zmírnit či částečně eliminovat. Cílem bakalářské práce bude seznámení s problematikou degradace olověných akumulátorů, dále pak návrh a výroba vybraného regenerátoru. Důležitým výstupem BP bude ověření, zda je zvolená metoda desulfatace funkční a využitelná k pravidelné údržbě olověných akumulátorů.

Specifikace zařízení a úkoly bakaláře:

1. Seznámení s problematikou degradace akumuláčnických schopností olověných akumulátorů
2. Způsoby prevence proti sulfataci
3. Metodiky pro efektivní nabíjení Pb akumulátorů
4. Komerčně dostupné zařízení a přípravky pro desulfataci
5. Návrh vlastního zařízení
6. Oživení zařízení a funkční test
7. Test regenerace Pb akumulátoru

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**KOZUMPLÍK, Josef. Olověné akumulátory. Praha: NADAS, 1975.**

**KOZUMPLÍK, Josef. Akumulátory vozidel. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1977.**

**CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.**

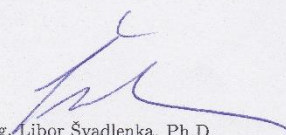
Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D.**


Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **11. prosince 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18. května 2018**

  
doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.  
děkan

L.S.

  
Ing. Dušan Čermák, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. března 2018

## **Prohlášení autora**

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16.5.2018

Radek Ackermann

## **Poděkování**

Na prvním místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Ondřeji Sadílkovi, Ph.D. za jeho pomoc a ochotu při návrhu práce a zejména poté za pevné nervy a úsilí při ožívování zařízení. Dále bych chtěl poděkovat rodině za příkladnou psychickou a finanční podporu během mého studia. A v poslední řadě bych rád poděkoval všem kamarádům a kolegům, kteří se užitečnými radami podíleli na vývoji regenerátoru.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou degradace olověných akumulátorů, jejím řešením a návrhem regenerátoru olověných akumulátorů. První část se zabývá představením popisu funkce akumulátorů, jejich nabíjení, vybíjení a vlivy na degradaci akumulátorů. Další částí je návrh a realizace regenerátoru olověných akumulátorů, kde je detailně popsána i jeho funkce. Poslední část je věnována testování regenerátoru a zhodnocení jeho funkce.

## **Klíčová slova**

Akumulátor, regenerátor, desulfátor, sulfatace, měnič, PCL, pulzy, simulace.

## **Title**

Regenerator of lead acid accumulators

## **Annotation**

This bachelor's study looks into problems of lead-acid accumulator degradation, solution and design of lead-acid accumulator regenerator. The first part deals with the description of the batteries function, their charging, discharging and the effects on the battery degradation. Another part is the design and realization of the lead-acid accumulator regenerator, where its functions are described in detail. The last part is devoted to regenerator testing and evaluation regenerator function.

## **Keywords**

Accumulator, regenerator, desulfator, sulfation, converter, PCL, pulses, simulation.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	9
Historie.....	10
<b>1 AKUMULÁTORY</b> .....	12
1.1 Olověné akumulátory.....	12
1.1.1 Akumulátor se zaplavenými elektrodami .....	12
1.1.2 GEL VRLA.....	13
1.1.3 AGM VRLA .....	14
1.1.4 Srovnání GEL a AGM .....	14
1.1.5 Elektrochemické reakce .....	15
Vybití.....	16
Nabíjení.....	16
1.2 Ostatní druhy akumulátorů .....	17
1.2.1 Princip.....	17
1.2.2 Druhy lithiových akumulátorů a využití v praxi.....	18
Lithium-iontové .....	18
Lithium-polymerové .....	18
1.2.3 Nevýhody lithiových akumulátorů .....	19
<b>2 NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ</b> .....	20
2.1 Nabíjecí charakteristiky .....	20
2.1.1 Nabíjecí charakteristika typu U .....	20
2.1.2 Nabíjecí charakteristika typu I.....	21
2.1.3 Nabíjecí charakteristika typu W .....	21
2.1.4 Nabíjecí charakteristika typu IU .....	22
2.1.5 Pulzní nabíjení .....	23
2.2 Vybití akumulátoru .....	23
2.2.1 Vybití křivky .....	24
2.2.2 Samovybití .....	25
<b>3 DEGRADACE OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ</b> .....	26
3.1 Sulfatace.....	26
3.2 Vrstvení a odvodňování elektrolytu.....	27
3.3 Nerovnoměrně rozložený proud .....	27
3.4 PCL – ztráta kapacity.....	28
3.4.1 PCL-1.....	28

3.4.2	PCL-2.....	28
3.4.3	PCL-3.....	28
<b>4</b>	<b>REGENERACE AKUMULÁTORŮ.....</b>	<b>29</b>
4.1	Chemická a elektrochemická desulfatace .....	29
4.2	Dostupná řešení desulfátorů.....	29
<b>5</b>	<b>NÁVRH DESULFÁTORU.....</b>	<b>32</b>
5.1	Vybrané řešení .....	32
5.2	Návrh komponent desulfátoru .....	34
5.2.1	Návrh výkonové části .....	34
5.2.2	Návrh řídicí části.....	36
5.2.3	Návrh ochranné části .....	38
5.3	Simulace a popis navrženého zapojení .....	38
5.3.1	Simulace ochranné části.....	38
5.3.2	Simulace řídicí části.....	39
5.3.3	Simulace výkonové části .....	41
5.4	Návrh v Autodesk Eagle .....	42
5.4.1	Deska plošného spoje (DPS).....	43
<b>6</b>	<b>VÝROBA DESULFÁTORU .....</b>	<b>45</b>
6.1	Oživování desulfátoru .....	46
<b>7</b>	<b>TEST DESULFÁTORU .....</b>	<b>47</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>48</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>49</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>53</b>



## Úvod

Žijeme v době, kdy jsme obklopeni stále složitějšími elektronickými zařízeními a většina lidské populace si nedovede bez těchto vymožeností představit svůj život. Elektronika zažívá plný rozkvět i v oblastech, pro která byla, a zatím stále je typická vůně benzínu. Zásoby ropy se však tenčí, což se odráží v cenách finálních pohonných hmot. Na scénu přichází rozvoj elektro chemických akumulátorů a obnovitelných zdrojů energie, jako jsou například fotovoltaické a větrné elektrárny.

Základem všeho elektronického tedy začíná být akumulátor, ať už ve formě pomocného zdroje nebo jako hlavní zdroj energie například u elektromobilů případně u ještě nedávno stěží představitelných nákladních vozidel. Ruku v ruce s tímto pokrokem jde i vývoj akumulátorů snažící se zlepšovat jejich technologické parametry. Stále hojně využívaný olověný akumulátor, který se na trhu drží zejména díky své jednoduchosti, ceně a odolnosti proti vnějším vlivům, začínají vytlačovat články na bázi lithia, které mají mnohem větší hustotu energie, ale zato vyžadují mnohem sofistikovanější způsoby ochrany akumulátoru při nabíjení a jsou mnohem náchylnější na mechanické poškození (hrozí destrukce článku doprovázená požárem). Což navíc potvrzují události poslední doby, kdy v těsném časovém sledu došlo k nehodám dvou osobních automobilů značky Tesla. Automobily ihned po nárazu začaly nekontrolovatelně hořet, a to právě díky mechanickému poškození bateriových lithiových článků. Z uvedeného plyne, že moderní akumulátorové systémy sice dosahují špičkových parametrů, ale stále je třeba investovat do vývoje hlavně v oblasti bezpečnosti.

V případě osobních vozidel se spalovacím motorem se dnes stále pro start motoru využívají olověné akumulátory, které jsou z valné většiny bezúdržbové. Běžný uživatel tak nemusí akumulátorům věnovat žádnou péči a zapomene tak (minimálně do nadcházející zimy), že vůbec nějaký akumulátor ve vozidle má. To vše je zapříčiněno dlouholetým vývojem olověných akumulátorů po technologicko-chemické stránce, ale také rozvojem a nasazením inteligentních systémů starajících se o údržbu a správné dobíjení akumulátoru.

Problém nastává v situaci, kdy akumulátor nečekaně vypoví službu. A to zejména díky degradačním procesům, které odstartovala chybná údržba. Jednou z hlavních degradací akumulátoru je sulfatace, které se věnuje zejména z hlediska jejího odstranění tato bakalářská práce.

## Historie

Kořeny primitivních akumulátorů sahají až do roku kolem 240 před naším letopočtem k předmětu zvanému „Bagdádská baterie“. Tento akumulátor byl objeven v roce 1936 na území Iráku a v roce 1938 byl popsán jeho velmi jednoduchý princip. Jedná se v podstatě o galvanický článek tvořený hliněnou nádobou se stočeným měděným plechem a do něj zasunutou železnou tyčí. Při naplnění džbánu kyselinou citrónovou dojde k elektrolyze, ovšem energie získaná z tohoto článku je natolik nízká, že mnoho historiků je na pochybách o využití tohoto zařízení jakožto akumulátoru v tehdejší parthské říši.

Prvními skutečně doložitelní zakladatelé akumulátoru přišli až v 18. století. Prvním z nich je Luigi Galvani a jeho pokus s bimetalem a žabími stehýnky. Druhým vynálezcem byl Alessandro Volta, jehož největším vynálezem byl tzv. Voltův sloup. Voltův sloup byl první skutečným primárním elektrickým článkem. Tento článek byl tvořen vzájemně odizolovanými kotoučky mědi a zinku. Jako izolant byl použit papír (v některých zdrojích je uváděn kus látky) namočený v zředěné kyselině. Díky reakci mezi elektrolytem a volnými elektrony na povrchu kovů se objeví na výstupu tohoto článku napětí, jehož velikost je závislá na počtu Zn a Cu kotoučků. [1]

První skutečný sekundární článek dokázal vyrobit v roce 1859 Gaston Planté. Tento sekundární článek byl tvořen několika vodivými olověnými destičkami ponořenými v roztoku kyseliny sírové. Jednotlivé destičky byly opět odděleny látkovými separátory. Olověné akumulátory založené na konstrukci, kterou definoval Planté dodnes nenašly přemožitele.

Vývoj akumulátorů dále urychlil zejména velké světové válečné konflikty. Již v první světové válce se experimentovalo s elektromobily poháněnými Ni-Fe akumulátory, ovšem jak se již velmi brzo na bojištích ukázalo, olověný akumulátor díky své jednoduché konstrukci a odolnosti vůči vnějším vlivům získal v armádní i civilní technice prvenství. V průběhu druhé světové války byl německými inženýry představen první použitelný Ni-Cd akumulátor, který v porovnání s olověným akumulátorem poskytuje větší energetickou hustotu, díky čemuž byl využíván především v leteckých aplikacích.

Akumulátory, a to zejména olovené prošly v dalších desítkách let značným vývojem. Jedním z hlavních mezníků je patent VRLA (Valve Regulated Lead Acid) v roce 1957. Ventilem řízené olovené akumulátory mají základní konstrukci stejnou jako každý jiný olovený akumulátor, avšak elektrolyt je zde vázán v křemičitém gelu (takzvané Gelové akumulátory) nebo v netkané textilií ze skelného vlákna (AGM).

Posledním obrovským milníkem, bylo představení lithiového (Li-Ion) akumulátoru firmou SONY v roce 1990. Díky jejich vlastnostem, jakou je například vysoká kapacita s minimální hmotností samotného akumulátoru mělo jejich představení okamžitý úspěch a téměř okamžitě došlo k jejich nasazení ve videokamerách, mobilních telefonech, domácích spotřebičích. Evolucí těchto akumulátorů vznikly takzvané Li-Pol akumulátory, lišící se od konvenčních Li-ion článků skupenstvím elektrolytu. Ovšem lithium polymerové akumulátory díky své vyšší ceně byly od samého počátku nasazovány do nejšpičkovějších zařízení (například i do RC modelů), a tak jejich masové rozšíření bylo pomalejší. Díky jejich vlastnosti uchovávat nejvyšší hustotu energie a velmi vysokému počtu nabíjecích cyklů se používají s vysokou oblibou dodnes.

# 1 Akumulátory

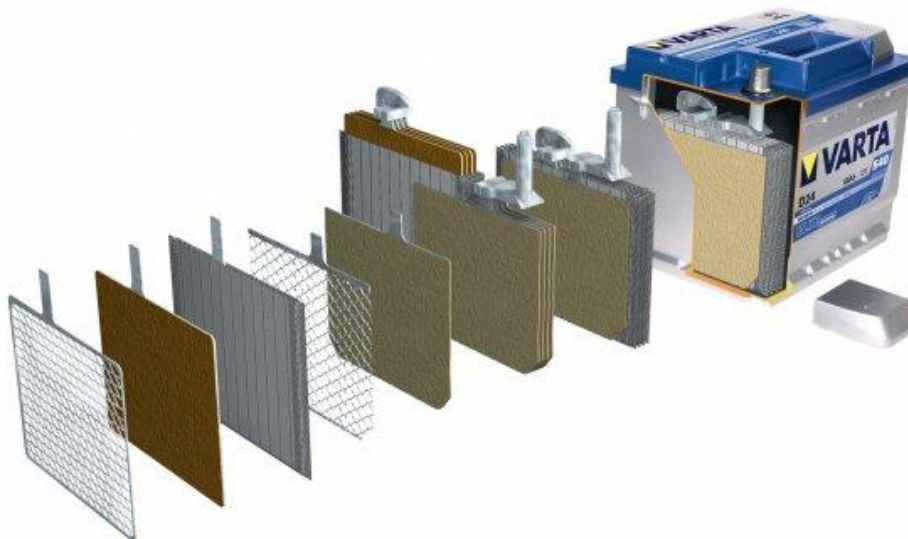
## 1.1 Olověné akumulátory

V této kapitole jsou uvedeny typy olověných akumulátorů a jejich konstrukce.

### 1.1.1 Akumulátor se zaplavenými elektrodami

Jedná se o akumulátor vyžadující údržbu, i když díky moderní konstrukci mřížek bývá v některých zdrojích uváděn již jako bezúdržbový. Konstrukce tohoto typu akumulátoru je ze všech níže uváděných typů akumulátorů nejstarší, ale díky jednoduché konstrukci došlo k jeho mnohaletému vývoji a je v hojných aplikacích využíván dodnes.

V tomto typu akumulátoru jsou vzájemně izolované olověné elektrody ponořené v roztoku kyseliny sírové. Mřížky obou elektrod jsou u novějších typů legovány především vápníkem, ale je také možné narazit na řešení, kde je kladná mřížka dotována antimonem a záporná vápníkem. Rozdíl v těchto dvou koncepcích je patrný zejména při samovybíjení akumulátoru. U modernější koncepce Ca-Ca je hodnota samovybíjení přibližně 0,3 % za den, kdežto u Pb-Sb se hodnota samovybíjení pohybuje kolem jednoho procenta za den. Na mřížky elektrod je dále nanесena aktivní vrstva, kterou u kladné mřížky tvoří pórovitý oxid olovičitý ( $\text{PbO}_2$ ) a záporná elektroda je tvořena houbovitým olovem (Pb). [2]



Obr. 1.1 Konstrukce olověného automobilového akumulátoru [3]

Elektrody jsou tedy dále vzájemně odděleny pomocí separátorů. Tyto separátory musí být elektrolytem propustné, ale zároveň musí být elektricky a chemicky neaktivní, tak aby nedocházelo k nežádoucím zkratům mezi mřížkami. Již výše zmíněný elektrolyt je tedy tvořený roztokem kyseliny sírové a destilované vody ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  a  $\text{H}_2\text{O}$ ) o specifické hustotě

1,27 kg/l, která je ale teplotně závislá a se snižující se teplotou se jeho hustota zvětšuje. Hustota elektrolytu je jedním z nejdůležitějších parametrů tohoto typu akumulátoru, neboť při snížení hustoty o 0,01 g/cm<sup>3</sup> se sníží kapacita akumulátoru o 3 %. K snížení hladiny elektrolytu dochází běžně při takzvaném „plynování“, kdy se destilovaná voda začne rozkládat na vodík a kyslík a dojde tak k odparu. [4]

Elektrolyt tedy vyžaduje údržbu, která spočívá především v dolévání destilované vody. Akumulátor je tedy vybaven inspekčními zátkami zabezpečenými gumovým těsněním. Inspekce akumulátoru se také orientačně může provést pomocí indikátoru nabití. Jedná se o kuličkový hustoměr umístěný na jednom článku akumulátoru a jeho princip je názorný z následujícího obrázku.



Obr. 1.2 jedno a dvou kuličkový hustoměr [2]

### 1.1.2 GEL VRLA

VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid Batteries) neboli ventilem řízené akumulátory již zastupují bezúdržbové typy akumulátorů. Jejich nespornou výhodou je hermeticky uzavřená konstrukce, což představuje velké pozitivum pro případ úniku elektrolytu v případě nešetrného zacházení. Ventil u těchto typů akumulátorů je využíván jakožto bezpečnostní prvek, který zapůsobí (otevře) pokud při rekombinaci vzniklé plyny překročí únosnou mez tlaku uvnitř akumulátoru (10-40 kPa), ale také reguluje pracovní tlak uvnitř každého článku, což má příznivý dopad na rekombinaci.

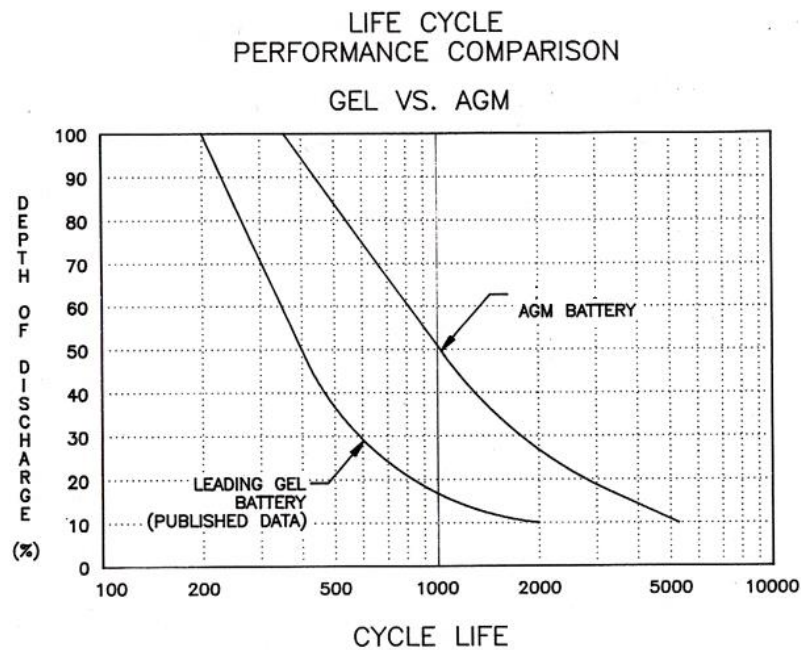
Gelový akumulátor je konstrukčně velmi podobný akumulátoru se zaplavenými elektrodami. Mřížky elektrod mají opět dotovány vápníkem, což se pozitivně odráží na snížení plynování. Hlavním rozdílem je elektrolyt, který je zahuštěn křemičitým prachem a vznikne tak tixotropní křemičitý gel. Dohromady se tedy jedná o mechanicky velmi odolnou bezúdržbovou konstrukci. Akumulátory s touto bezúdržbovou konstrukcí, ať už gelové či AGM (Absorbed Glass Mat), bývají označovány jako Maintenance Free. [5]

### **1.1.3 AGM VRLA**

AGM jsou akumulátory jejichž elektrolyt je absorbován v mikroporézní skelné tkanině dotované bórem, která tvoří separátor akumulátoru. Výhodou tohoto separátoru je vynikající iontová vodivost umožňující rychlou a účinnou rekombinaci. Použitím tohoto typu separátoru navíc zamezíme mezimřížkovým zkratům a vyhneme se tak riziku stratifikace kyseliny, která by vedla k sulfataci a následné degradaci akumulátoru. [6]

### **1.1.4 Srovnání GEL a AGM**

AGM akumulátory mají větší aktivní plochu mřížek, která vyniká již výše zmíněnou výbornou iontovou vodivostí. Proto jsou schopny podat větší výkony a startovací proudy při nižší okolní teplotě oproti akumulátorům gelovým, a to navíc při stejných rozměrech a stejné kapacitě akumulátoru. Bohužel, ale technologie AGM vychází cenově hůře a je více náchylná k takzvanému teplotnímu zkratu, který může zapříčinit i destrukci akumulátoru. Teplotní zkrat je doprovázen velkým množstvím plynů a může k němu dojít v případě nabíjení akumulátoru za „vysokých“ provozních teplot. [6]



Obr. 1.3 Srovnání životního cyklu gelového a AGM akumulátoru [7]

Gelové akumulátory jsou tedy méně citlivé na vyšší provozní teplotu (lze nabíjet i při provozní teplotě přesahující 40 °C) a také mají menší samovybití a vydrží déle ve stavu hlubokého vybití. Gelový akumulátor vydrží hluboce vybitý přibližně 4 týdny, kdežto údržbový akumulátor se zaplavenou elektrodou vydrží 1–3 dny. [8]

Použití konkrétního typu akumulátoru bude tedy záviset na aplikaci a podmínkách, v kterých bude od akumulátoru vyžadována pracovní schopnost. Nevýhodou všech výše zmíněných typů (tedy VRLA koncepce) je plynování, které je ale například u akumulátoru se zaplavenými elektrodami prospěšnou vlastností. Zde se musíme plynování akumulátoru vyvarovat, a tak je vhodné správně volit parametry pro nabíjení.

### 1.1.5 Elektrochemické reakce

Vzhledem k faktu, že olověný akumulátor je soustava dvou a více propojených elektrochemických článků, schopných elektrickou energii opětovně ukládat a odebírat formou chemické energie, bude nutno pro pozdější pochopení problému sulfatace uvést, co se vlastně odehrává v akumulátoru při nabíjení a vybíjení.

Berme tedy v potaz opět nejjednodušší variantu olověného akumulátoru. Kladná elektroda je tvořena olověnými deskami s oxidem olovičitým ( $\text{PbO}_2$ ). Záporná elektroda tvořena čistým houbovitým olovem. A elektrolyt je roztok kyseliny sírové a destilované vody ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  a  $\text{H}_2\text{O}$ ).

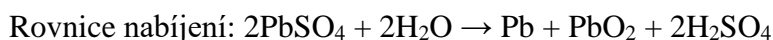
## Vybíjení



Při vybíjení začne procházet proud od záporné elektrody ke kladné. Začne se spotřebovávat kyselina sírová a obě elektrody se obalí síranem olovnatým ( $\text{PbSO}_4$ ). Dalším vzniklým produktem je voda (při nabití se přemění na vodík a kyslík). Díky vzniklé vodě začne elektrolyt řádnout a ztrácí se jeho hustota až na  $1,1 \text{ g/cm}^3$  a napětí zhruba  $1,75\text{V}$  na článek. Pokud v tuto chvíli nezačneme akumulátor nabíjet, nastane jev zvaný sulfatace. Při sulfataci dojde k rekrystalizaci síranu olovnatého, který se stává nerozpustným. [11]

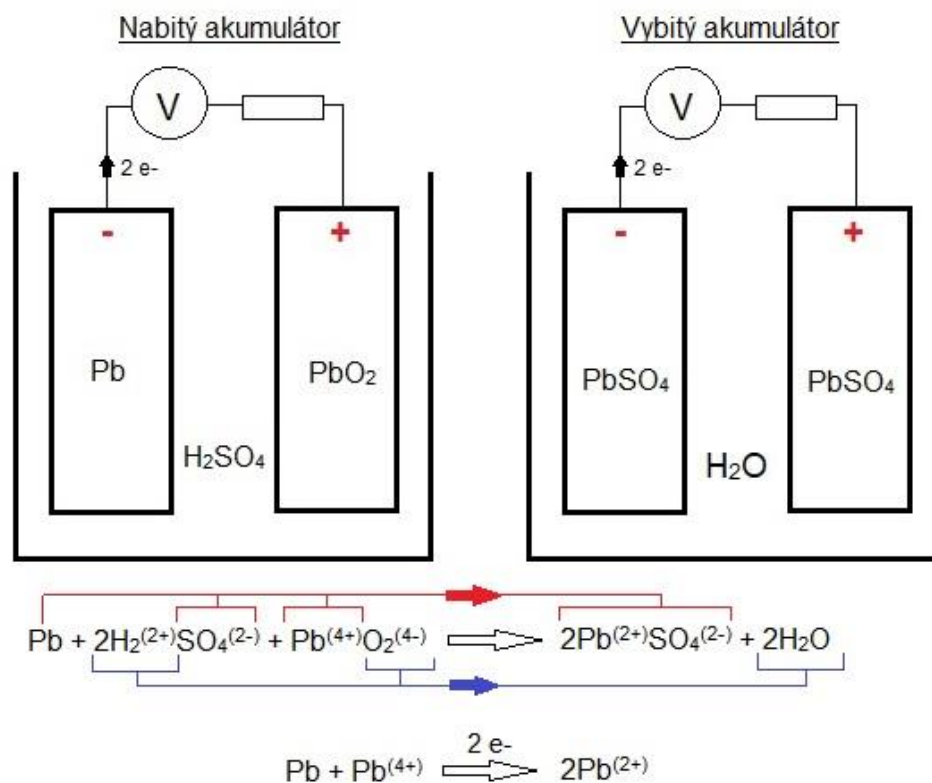
Každý akumulátor disponuje poměrně značným neduhem, jakým je samovybíjení. Při samovybíjení dochází opět k tvorbě nechtěného síranu olovnatého, a proto je vhodné s tímto neduhem počítat a akumulátorem nechat občas proběhnout udržovací proud. Rychlost samovybíjení je přímo závislá na stáří akumulátoru a okolní teplotě. Klasické akumulátory, díky samovolnému vybíjení, snižují své svorkové napětí asi o  $8\text{-}10 \text{ mV/den}$ , AGM akumulátory asi o  $3\text{-}4 \text{ mV/den}$  a gelové asi o  $2\text{-}3 \text{ mV/den}$ . [9], [10]

## Nabíjení



Při nabíjení je chemická reakce obdobná jako při vybíjení, jen má opačný směr. Působením elektrických sil dojde k rozkladu vody a síranu olovnatého. Díky tomu vzniknou molekuly kyseliny sírové. Na kladné elektrodě se začne tvořit kysličník olovičitý a na záporné houbovitě olovo. Hustota elektrolytu roste až do úplného rozpuštění všeho síranu olovnatého. Po jeho spotřebování se začne díky elektrolyze vody vylučovat vodík a kyslík. Dochází k plynování akumulátoru, což nám indikuje přibližně  $80 \%$  nabití akumulátoru. Vzniklá směsice plynů je vysoce výbušná třaskavina, a tak je zapotřebí její intenzivní odvětrávání (otevřením zátek akumulátoru/otevřením bezpečnostního ventilu). Stav plného nabití nastává při napětí  $2,7 \text{ V}$  na článek. [11]





Obr. 1.4 Chemické procesy znázorněné obrázkem

## 1.2 Ostatní druhy akumulátorů

V současné době jsou nejpoužívanější články pro elektroniku na bázi lithia. Lithiové akumulátory svými parametry hravě překonávají jak olověné akumulátory, tak i nikel-kadmiové a nikel-metal hydridové. Jejich největší předností je vysoká objemová a hmotnostní energie, netrpí paměťovým efektem, mají velmi nízkou úroveň samovybití a lze využít vysoké nabíjecí i vybíjecí proudy (až 20 C).

### 1.2.1 Princip

Název lithium-iontových akumulátorů je odvozen od iontů ( $\text{Li}^+$ ) putujících od jedné elektrody k druhé. Při nabíjení putují z katody na anodu a při vybíjení je tomu naopak. Lithiové akumulátory využívají pro katodu sloučeniny lithia (lithium-kobalt oxid ( $\text{LiCoO}_2$ ) a další) a záporná elektroda je vyrobena z uhlíkového materiálu. Elektrolyt je zde „bezvodný“ a je zde použito lithných solí nasáklých do separátorů.

Největším rozdílem od olověných akumulátorů, je fakt, že zde v podstatě neprobíhají chemické reakce. Ionty lithia se dokáží vmísit do mřížky záporné elektrody bez probíhající chemické reakce se samotným materiálem. [12], [13]

## 1.2.2 Druhy lithiových akumulátorů a využití v praxi

### Lithium-iontové

Li-ion akumulátory se vyskytují ve formě válcových (svítkových), hranolových či pytlíkových článků se jmenovitým napětím nejčastěji v rozmezí 3,2 – 3,7 V na článek. Elektrolyt bývá často alkalický. Kryt těchto akumulátorů je nejčastěji plastový či kovový. Některé články mají v sobě umístěny i bezpečnostní prvky, kterými jsou: proudové pojistky, ventily, termistory a elektronické obvody. [14]

V praxi se tyto akumulátory využívají především jako sérioparalelně řazené články v bateriích notebooků, ale také v hybridních automobilech a elektromobilech. Nastává zde ovšem značně omezující požadavek a tím je zajištění rovnoměrného proudového zatížení celé struktury článku a s tím související chlazení, nabíjení a vybíjení. K tomuto účelu se využívá nadřazený bateriový systém (BMS), který je schopen: hlídat napětí a teplotu na člancích, zasahovat do nabíjecího procesu (balancovat) a monitorovat vybíjení tak, aby se akumulátor nedostal do stavu hlubokého vybití. [13], [15]

### Lithium-polymerové

Dalším vývojovým stupněm je lithium-polymerový článek. Tento článek má oproti svému předchůdci menší rozměry, hmotnost a elektrolyt zde není nasáklý v separátorech, ale je ve formě polymerní sloučeniny. Kryt těchto článků je tvořen hliníkovou fólií. Elektrody mohou mít téměř libovolný tvar a jsou skládány na sebe, tudíž je zde možnost přizpůsobit rozměrově akumulátor požadavkům dané aplikace. Jmenovité (3,6 V) i nabíjecí napětí (4,2 V) je shodné s napětím u Li-ion článků. [12]

Lithiové akumulátory lze rozdělit do několika kategorií dle toho, z jakých materiálů jsou vytvořeny samotné elektrody. Příkladem mohou být články LiFePO<sub>4</sub> (lithium-železo-fosfát), které nahrazují olověné akumulátory v záložních zdrojích a LTO (lithium-titan) akumulátory fungující v dynamicky náročných aplikacích s požadavkem na rychlé nabíjení s vysokým počtem cyklů za nízkých teplot.

### **1.2.3 Nevýhody lithiových akumulátorů**

Paradoxně jednou z největších nevýhod je použití lithia, které při styku s vlhkostí degraduje, díky čemuž vznikají vyšší technologické nároky na provedení krytu článku. Krytí článku musí zabránit i mechanickému poškození. Vysoké množství uložené energie se při poškození velmi rychle přemění na teplo a dojde k nenávratné destrukci celého akumulátoru. Lithiové akumulátory navíc nejsou schopny udržet trvale kapacitu, ale degradují v čase. [12]

Jak jsem již výše uvedl, u článků na bázi lithia je kladen vysoký důraz na parametry nabíjení a vybíjení. Nabíjení probíhá výhradně charakteristikou IU s nastavením maximální napěťové hranice na 4,2V a proudovým omezením daným výrobcem článku. Pro správnou funkci lithiových článků je za uvažování výše uvedených předpokladů nezbytné využít BMS. [13], [14]

## 2 Nabíjení a vybíjení olověných akumulátorů

Nabíjecí proces, potažmo i nabíjecí soustava, hraje zásadní roli v životnosti akumulátoru. Nevhodně zvolený proces nabíjení má za důsledek daleko rozsáhlejší poškození bateriového článku než nevhodné vybíjení, proto mu bude věnováno podstatně více prostoru.

Nabíjení olověného akumulátoru lze rozdělit do třech nabíjecích pásem.

První pásmo je charakteristické rozkladem síranu olovnatého a následnou tvorbou kyseliny sírové v mřížkách elektrod. Hustota elektrolytu stoupá z  $0,95 \text{ g/cm}^3$  na  $1,15 \text{ g/cm}^3$  a napětí na  $2,2 \text{ V/článek}$  ( $13,2 \text{ V}$  u šesti článkového akumulátoru).

Plynule na první pásmo navazuje druhé, ve kterém dojde k přeměně většiny síranu olovnatého. Napětí vzroste na  $2,45 \text{ V/článek}$  a hustota elektrolytu na  $1,25 \text{ g/cm}^3$ .

Ve třetím pásmu, už dochází k překročení hranice  $2,45 \text{ V/článek}$  až na  $2,8 \text{ V/článek}$  a nastane již výše zmíněný rozklad vody na vodík a kyslík. Akumulátor začne „plynovat“ a hustota elektrolytu se zastaví na hodnotě  $1,28 \text{ g/cm}^3$ . Pokud nastane „plynování“ akumulátoru dříve než po překročení hranice  $2,45 \text{ V/článek}$ , tak je téměř jisté, že je akumulátor zasažen sulfatací. [16], [17]

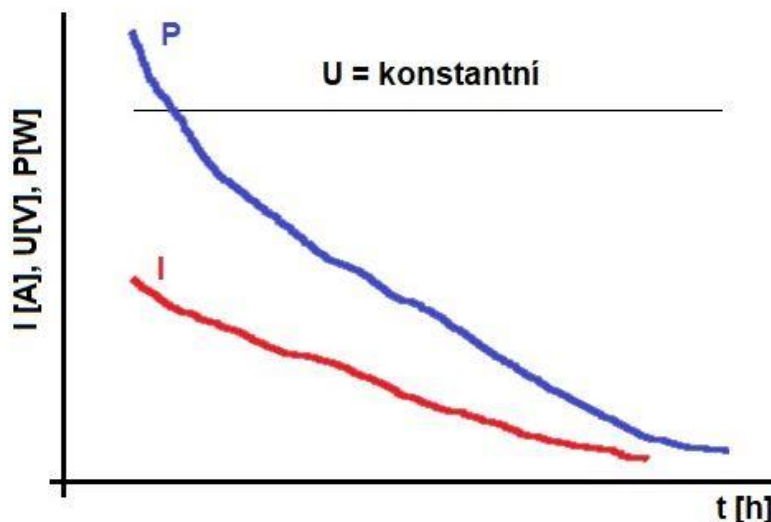
### 2.1 Nabíjecí charakteristiky

Nabíjecí charakteristiky se řídí výše uvedenými znalostmi o jednotlivých fázích nabíjení a slouží k řízení nabíjecího procesu. Volba vhodné charakteristiky zásadně ovlivní život akumulátoru.

#### 2.1.1 Nabíjecí charakteristika typu U

Na nabíjený akumulátor je přivedeno konstantní napětí o hodnotě „plynovacího napětí“. Obvodem začne procházet značný proud, jehož velikost závisí na hloubce vybití akumulátoru. Velikost počátečního proudu je vhodné omezit tak, aby nedošlo k přílišnému vývinu tepla a následně mezimřížkovému zkratu. Procházející proud začne se vzrůstajícím napětím akumulátoru klesat.

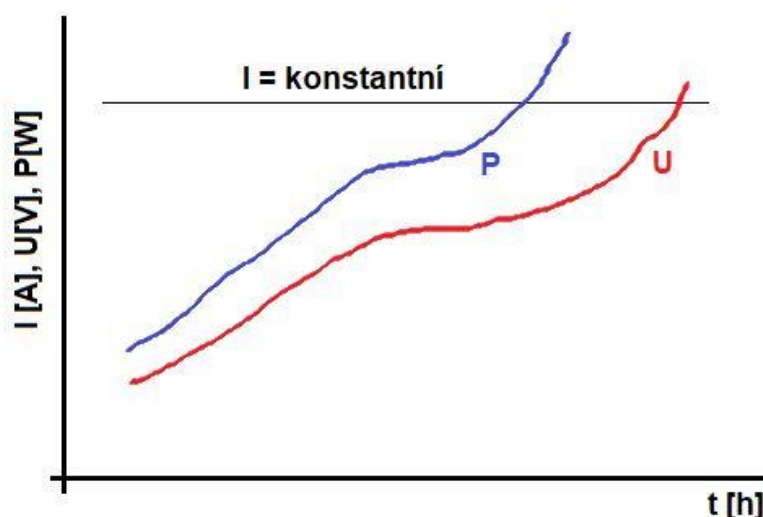
Tato nabíjecí charakteristika je vhodná zejména pro takzvané rychlonabíjení. [17]



Obr. 2.1 Nabíjecí charakteristika typu U

### 2.1.2 Nabíjecí charakteristika typu I

Na svorky akumulátoru je v tomto případě přiveden konstantní proud. Velikost proudu se zpravidla volí na jednu desetinu kapacity akumulátoru. Během nabíjení opět poroste napětí na člancích na hodnotu 2,4 V/článek. Problém této charakteristiky je možnost značného přebíjení akumulátoru.



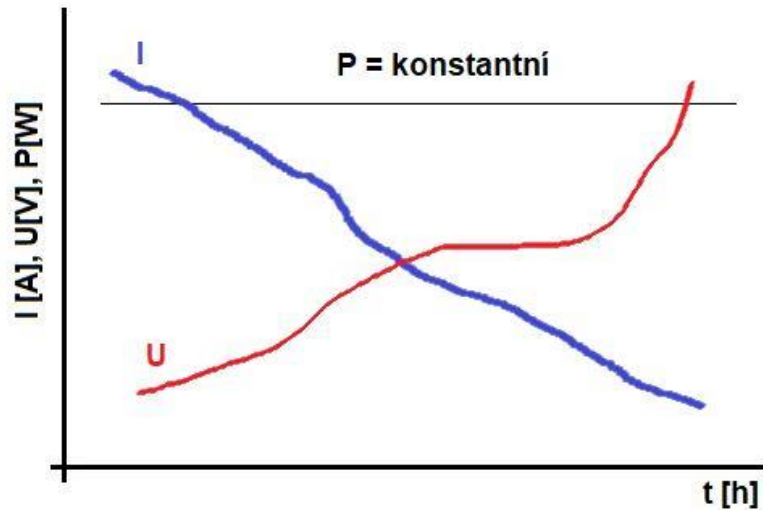
Obr. 2.2 Nabíjecí charakteristika typu I

### 2.1.3 Nabíjecí charakteristika typu W

Nabíjený akumulátor je připojen na napěťově měkký zdroj. Nabíječ tedy pracuje se zvyšujícím se napětím a velmi pozvolna klesajícím proudem. Ze zdroje je tedy po celou dobu nabíjení odebrán přibližně konstantní výkon. Tato nabíjecí charakteristika se stala velmi

oblíbenou, neboť celou dobu pracuje s poměrně vysokými proudy a umožňuje tak rychlonabíjení. Jediným problémem je opět nutnost určení konce nabíjení.

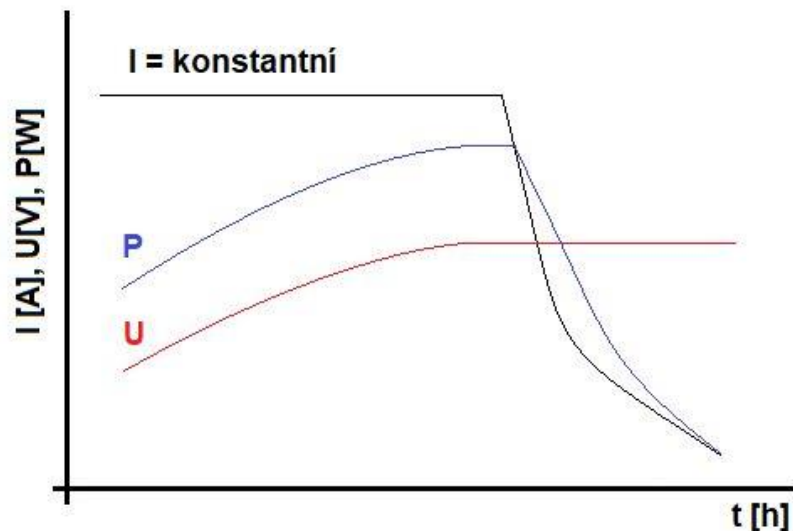
(PZEOP AKU část 2)



Obr. 2.3 Nabíjecí charakteristika typu W

#### 2.1.4 Nabíjecí charakteristika typu IU

V praxi se obvykle využívá kombinace výše uvedených charakteristik. Jednou z takových kombinací je právě charakteristika typu IU. Nabíjený akumulátor je nejprve nabíjen vysokým konstantním proudem a po dosažení „plynovacího“ napětí přejde nabíječ na nabíjení pomocí konstantního napětí, pomocí něhož dojde k finálnímu dobití. [13]



Obr. 2.4 Nabíjecí charakteristika typu IU

### 2.1.5 Pulzní nabíjení

Velmi výhodné z hlediska rychlosti je nabíjení pomocí „pulzního“ proudu. Pokud bychom chtěli nabíjet rychleji pomocí například charakteristiky typu U, znamenalo by to zvětšit hodnotu nabíjecího proudu, což by ale mělo za následek snížení životnosti akumulátoru.

Průběh pulzního nabíjení obsahuje libovolné množství kladných pulzů a libovolné množství záporných impulzů o velikosti přibližně 1/10 proudu nabíjecího. Proces pulzního nabíjení lze navíc velmi snadno řídit změnou parametrů střídavy pulzů (výška/šířka pulzu). Vybíjecí proud má jisté depolarizační účinky, které velmi příznivě působí na akumulátor zasažený sulfatací, zvyšuje účinnost nabíjení, a tedy dochází k regeneraci akumulátoru. [17]

Při použití pulzního nabíjení je účinnost nabíjení až 98 % na rozdíl od konvenčního nabíjení, které dosahuje účinnosti pouze 85 až 90 %. Téměř veškeré moderní nabíječky využívají principu pulzního nabíjení, a to jednak díky jednoduchosti řízení procesu a jeho účinnosti, ale také významným snížením rozměrů nabíječe samotného. [18]



Obr. 2.5 Ukázka průběhu napětí na článku při použitím pulzním režimu [19]

## 2.2 Vybíjení akumulátoru

Důležitým parametrem při vybíjení akumulátoru je takzvaná hloubka vybití. Hloubka vybití (DOD) určuje odebranou energii z článku a udává se v %. Obecně platí, že pokud je akumulátor vybíjen do 10 % DOD, tak výrazně nesnížíme životnost akumulátoru, ale pokud akumulátor pravidelně vybíjíme do 100 % DOD, tak snížíme jeho životnost až 10 x. Hloubka

vybití poškozuje akumulátor zejména díky sulfataci elektrod, která je podrobněji rozebrána dále v této práci. [20]

Významnými parametry při vybíjení akumulátoru jsou také vybíjecí proudy krátkodobé a dlouhodobé. Krátkodobý proud, je definován jako proud, který může být ze svorek akumulátoru odebírán pouze po stanovenou dobu, a to za stanovených podmínek.

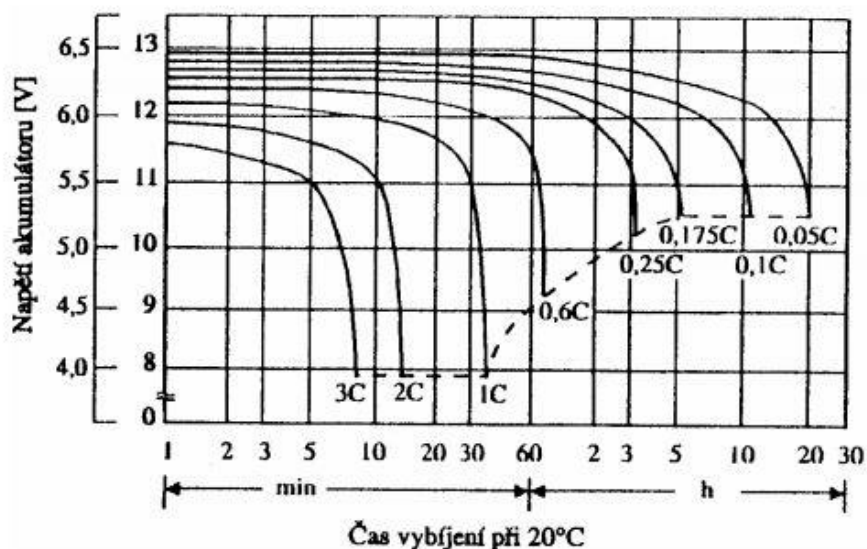
Mezi podmínky určené výrobcem patří:

- Velikost odebíraného proudu
- Doba, po kterou lze proud odebírat
- Doba, kterou je třeba vyčkat, než provedeme další proudový odběr.

Dlouhodobý (Trvalý) vybíjecí proud je definován jako proud, který lze ze svorek akumulátoru odebírat neomezeně dlouhou dobu až do úplného vybití. Jeho hodnota se udává v násobcích číselné hodnoty kapacity článku v Ah a označuje se jako „C“. Například pro článek 100Ah představuje proud 50 A hodnotu 0,5 C. [13]

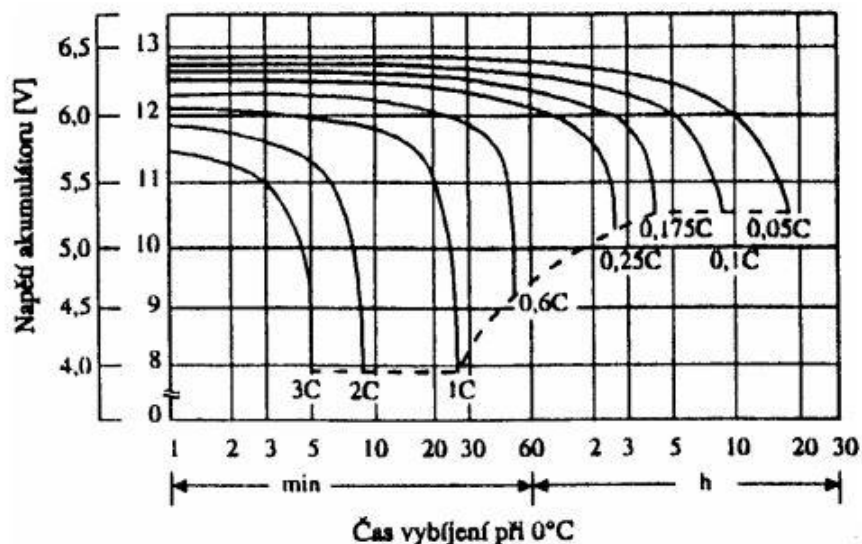
### 2.2.1 Vybíjecí křivky

Doba vybíjení akumulátoru tedy závisí na výše uvedeném vybíjecím proudu a také na velikosti pracovní teploty článku a teplotě okolí. Teplotně závislý je v akumulátoru především elektrolyt (kapacita akumulátoru), respektive jeho hustota, která při vzrůstající teplotě klesá. Při teplotě 25 °C je hustota elektrolytu 1,28 g/cm<sup>3</sup>, ale například při teplotě 10 °C je hustota již 1,29 g/cm<sup>3</sup>. Moderní systémy už ovšem dokáží články temperovat a klimatizovat, což se příznivě projeví na stabilní hodnotě kapacity akumulátoru.



Obr. 2.6 Typické vybíjecí křivky při teplotě 20 °C [21]





Obr. 2.7 Typické vybíjecí křivky při teplotě 0 °C [21]

Z vybíjecích křivek je jednak patrný vliv teploty a velikosti vybíjecího proudu na rychlost vybití akumulátoru, ale také velikosti konečného napětí. Hodnota konečného napětí je u vyšších vybíjecích proudů nižší než při velmi nízkých hodnotách proudu. Z toho důvodu je u nízkých hodnot vybíjecích proudů důležité pečlivě hlídat hodnotu konečného napětí a poté odpojit zátěž. [21]

### 2.2.2 Samovybití

Jedná se o neduh každého oloveného akumulátoru. Dochází k němu vlivem termodynamické nestálosti obou elektrod. Elektrody jsou schopny reagovat s vodným roztokem a reakci doprovází uvolňování vodíku a kyslíku. Dále může docházet k reakci oxidu olovičitého s olovenými mřížkami elektrod. Negativní vliv na samovybití má především teplota, v níž akumulátor skladujeme a stáří akumulátoru. Hodnota samovybití se u moderních článků pohybuje zhruba okolo 2-3 % za měsíc.

## 3 Degradace olověných akumulátorů

### 3.1 Sulfatace

Největším nepřítelem olověných akumulátorů z hlediska jejich degradace je takzvaná sulfatace elektrod neboli tvorba síranu olovnatého na mřížkách elektrod.

Síran olovnatý se tvoří na mřížkách elektrod zejména při hlubokém vybíjení. Jemně zrnité krystalky síranu olovnatého se časem postupně zvětšují, neboť se síran přednostně váže na již vzniklé krystaly. Při tvorbě této krystalické hmoty se tedy zmenšuje aktivní plocha elektrod, což má za následek snížení kapacity akumulátoru. Příznakem akumulátoru zasaženého sulfatací je zhoršený proces nabíjení. Při nabíjení nedojde k redukci síranu olovnatého, ale začne se spíše masivně vyvíjet vodík na záporné elektrodě a tím dojde předčasnému plynování akumulátoru.

Sulfatace elektrod vede také k mechanickému zatěžování článků. Časem díky nadměrné zátěži dojde k postupnému oddělování aktivních ploch spolu se sulfátem olova a k nenávratnému poškození článků. Sulfát olova je poměrně měkký materiál, který odpadáva z desek velmi snadno a začne se usazovat ve formě kalu na dně nádoby akumulátoru. Tento kal může v krajním případě způsobit i zkrat mezi mřížkami. [22], [23]

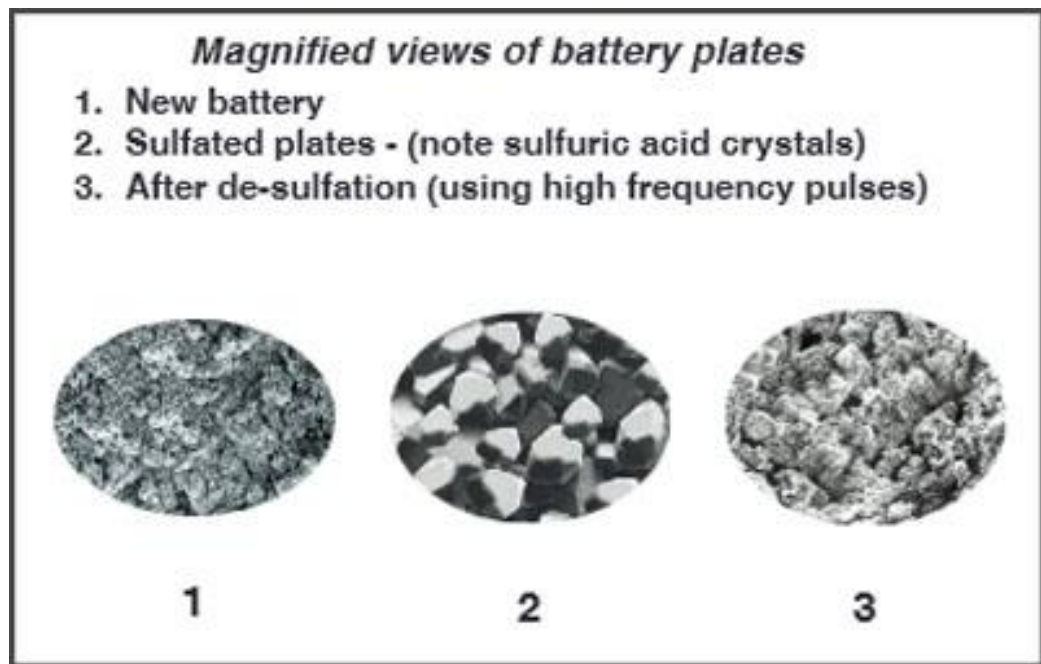
Kromě výše zmíněných projevů sulfatace, dochází také k zvětšování vnitřního odporu akumulátoru, což má za následek zmenšení maximálního proudu dostupného z akumulátoru. Krystaly síranu olovnatého jsou schopny vytvořit na plochách mřížek izolační vrstvu, která je schopná snížit hodnotu proudu akumulátoru až na 10 % původní jmenovité hodnoty. [23]

Sulfatace akumulátoru je vratným jevem, ale jen do určité meze. Pokud nedojde k takzvané nevratné sulfataci, tedy k znemožnění přístupu elektrolytu k funkční aktivní hmotě, lze sulfataci řešit několika způsoby. [23]

Prvním ze způsobů je nabíjení malým konstantním proudem o velikosti cca pěti setin násobku kapacity akumulátoru až do úplného nabití. Což je ale výhodné jen u velmi slabě zasulfátovaného akumulátoru. U hodně zanedbaného akumulátoru je možné zkusit nahradit starý elektrolyt destilovanou vodou a nabíjet jej proudem o velikosti cca dvou setin násobku jeho kapacity až do hodnoty svorkového napětí přibližně 15 V a poté vyměnit destilovanou vodu za čerstvý elektrolyt. [22]

Případně lze využít poznatku, na němž je založena i praktická část této bakalářské práce. Princip spočívá v nahrazení stejnosměrného nabíjecího proudu (pro nějž je hmota ze síranu olovnatého izolantem) střídavým proudem. Experimentálně bylo zjištěno, že pulsy o určité frekvenci, tvaru a amplitudě působící po určitou dobu, způsobí „rozklad“  $\text{PbSO}_4$  na  $\text{Pb}$  a  $\text{SO}_4$ .

Pb se vrátí zpět na elektrody a  $\text{SO}_4$  do elektrolytu, čímž zapříčiní nárůst jeho hustoty a tím pádem i obnovení kapacity akumulátoru. [24]



Obr. 3.1 Detail na elektrody zasažené sulfatací a detail po desulfataci [25]

### 3.2 Vrstvení a odvodňování elektrolytu

Při provozu akumulátoru dochází k rozdělení (vrstvení) hladin elektrolytu dle hustoty. Elektrolyt s vyšší hustotou se začne hromadit u dna nádoby spolu se sulfáty olova. Tento jev se nazývá stratifikace a vede jednak k nerovnoměrnému vybíjení článků, ale také později napomáhá sulfataci článků. Tento jev se projevuje zejména u akumulátorů s vyšší výškou a lze se mu poměrně efektivně vyhnout pomocí plynování akumulátoru při nabíjení.

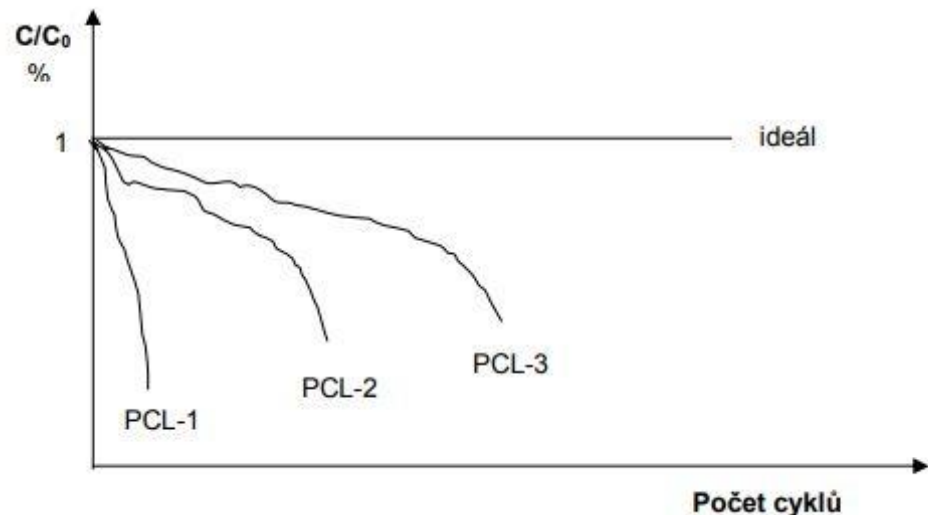
Pokud budeme aktivně využívat plynování akumulátoru tak se sice vyhneme nadměrnému vrstvení elektrolytu, ale nastane problém s nedostatkem vody v akumulátoru. Při procesu plynování, jak již bylo uvedeno, dochází k rozkladu vody na kyslík a vodík. U akumulátorů se zaplavenými články je tedy třeba kontrolovat hladinu elektrolytu a v případě potřeby dolévat destilovanou vodu. [23]

### 3.3 Nerovnoměrně rozložený proud

Dalším nepříznivým faktorem ovlivňující životnost akumulátoru je nerovnoměrně rozložený nabíjecí/vybíjecí proud. Nerovnoměrné rozložení proudů způsobuje nerovnoměrné vytěžování aktivních hmot obou elektrod. Tomu lze předejít volbou vhodného nabíjecího procesu, případně mechanickou úpravou povrchu elektrod. [26]

### 3.4 PCL – ztráta kapacity

U VRLA akumulátorů vytěžovaných na 100 % DOD dochází k velmi razantnímu snížení životnosti. Vlivem kombinací degradačních procesů dojde k předčasné ztrátě kapacity (PCL-premature capacity loss). [27]



Obr. 3.2 Závislost kapacity na životnosti olověného akumulátoru [27]

#### 3.4.1 PCL-1

Mřížky elektrod prvních VRLA akumulátorů se nesly ve znamení bez-antimonových slitin. Antimon byl nahrazen vápníkem z důvodu požadavků na nízkou úroveň plynování. Bohužel to vedlo při cyklování k vytvoření vysoko-ohmové vrstvy na rozhraní aktivní hmoty a povrchu žebra kladné elektrody, což vedlo k velmi předčasnému selhání akumulátoru. [27]

#### 3.4.2 PCL-2

Po vyřešení prvního problému se ukázalo, že VRLA akumulátory stále zaostávají oproti svým předchůdcům, tedy akumulátorům se zaplavenými elektrodami. Druhým problémem bylo zjištění ztráty soudržnosti a progresivnímu rozpínání aktivní hmoty při konverzi  $\text{PbO}_2$  na  $\text{PbSO}_4$ . Řešením je zvětšit přítlak ve směru kolmém na rovinu elektrod, což je ale problém u silně stlačitelných separátorů ze skelných vláken u AGM akumulátorů. [16] [27]

#### 3.4.3 PCL-3

Tento degradační mechanismus se objevil u hybridních vozidel. V hybridních vozidlech jsou akumulátory zatěžovány vysokými proudy v režimu částečného stavu nabití (HRPSoC). To se projeví zvýšenou sulfatací článků a vzhledem k tomu, že tento akumulátor není nikdy plně nabit, tak neexistuje možnost, jak při provozu vzniklé sulfáty odstranit. [16] [27]

## 4 Regenerace akumulátorů

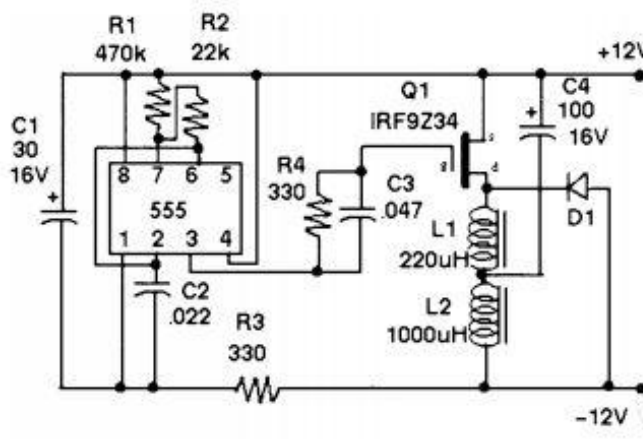
Jak jsem již uvedl, sulfatace je do určité míry plně reverzibilní. Existují tedy dvě základní cesty, jak prodloužit životnost akumulátoru zasaženého sulfatací.

### 4.1 Chemická a elektrochemická desulfatace

Chemické cesty desulfatace nejsou příliš oblíbené, vzhledem k jejich ceně a vedlejším účinkům. Pokud se běžný uživatel vydá cestou chemické desulfatace použije nejspíše roztok EDTA. Tento roztok po aplikaci oddělí vysoko-ohmovou vrstvu olova od aktivní vrstvy elektrod. Oddělený materiál se ale nerozpustí úplně a zůstane ve formě kalu na dně nádoby, čímž zvýší riziko zkratu, samovybíjení a pozitivně podpoří opětovnou sulfataci. Touto chemickou cestou tedy provedeme pouze částečnou desulfataci, proto se v daleko větší míře využívá účinků střídavého proudu. Zjednodušený princip elektrochemické desulfatace jsem již uvedl v kapitole o sulfataci, proto nyní uvedu rovnou praktické aplikace desulfátoru. [24]

### 4.2 Dostupná řešení desulfátorů

Prvním, kdo veřejně publikoval jednoduché reálné zapojení desulfátoru byl Ing. Alastair Couper. Pan Couper představil v časopise Homebrew [28] hned dvě verze desulfátoru, a to jak pro 12 V systém tak i pro 24 V systém. Navrhnutý desulfátor generuje proudové pulzy o frekvenci 1 kHz se špičkovou hodnotou proudu 3 A, což umožňuje použít desulfátor i při připojení akumulátoru k řídicímu systému. Možným neduhem publikovaného zapojení je doba desulfatace, která se může pohybovat až v řádech měsíců.



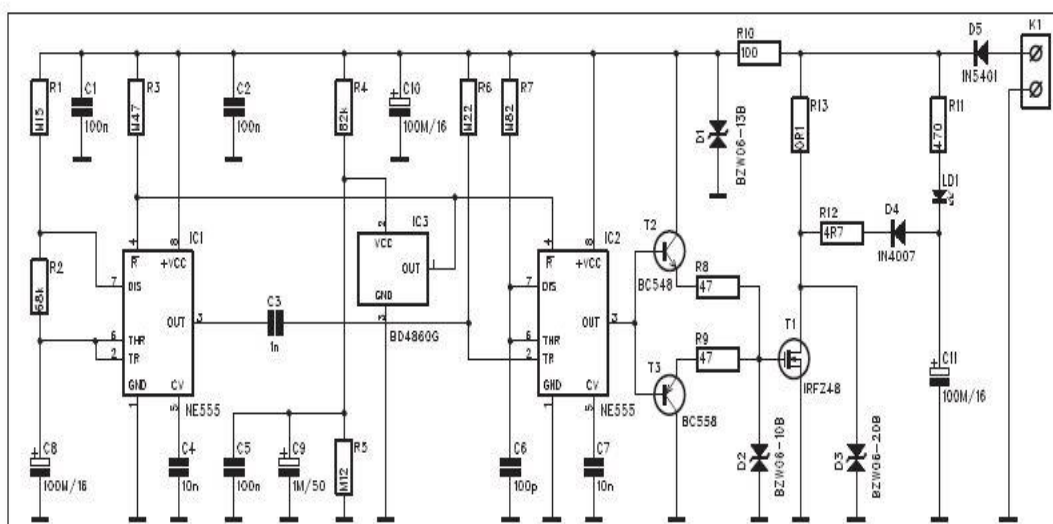
Obr. 4.1 Desulfátor (12 V) publikovaný Alastairenem Couperem [28]

Princip tohoto zapojení je velmi prostý. Základ tvoří časovač 555, který řídí dobu otevření tranzistoru Q1. V případě rozepnutého stavu tranzistoru Q1 dochází k nabíjení k nabíjení kapacity C4 přes indukčnost L2. Následně dojde k otevření tranzistoru výstupem

z časovače a díky tomu se nabije indukčnost L1. Po přibližně 50ms dojde opět k uzavření tranzistoru a cívka L1 předá svoji získanou energii zdroji přes diodu D1 ve formě krátkého strmého pulzu. Význam dolnoproustného filtru tvořeného indukčností L2 je značný. V případě absence filtru by efekt proudových špiček směrem k akumulátoru nebyl zajištěn, neboť by dioda D1 pracovala jako dioda nulová k cívce L1. [16]

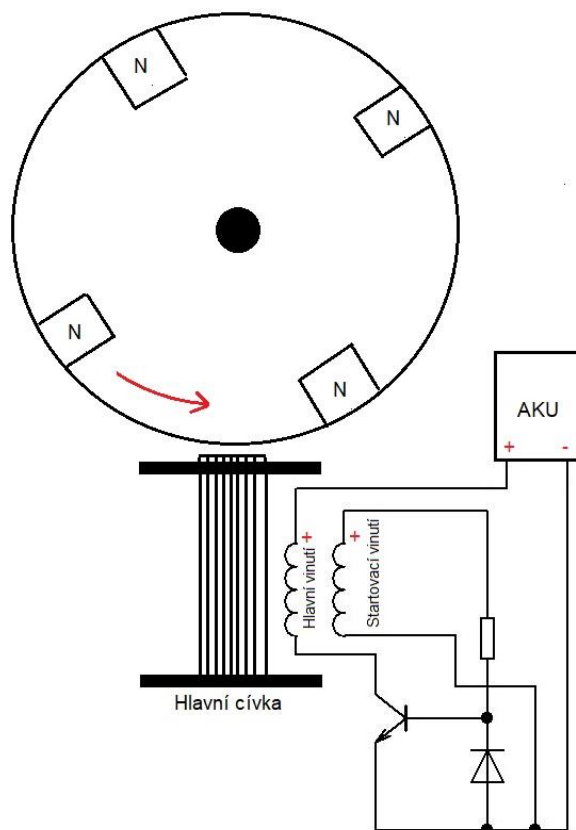
O výrazné vylepšení desulfátoru se postaral Ing. Matěj Gálus. Tento desulfátor je již schopný dodat při frekvenci 6 kHz proudové špičky o hodnotě až 30 A. Kromě značného výkonového posílení provedl autor hned několik zajímavých vylepšení. Prvním z nich je „podpěťová“ ochrana, která zajišťuje vypnutí desulfátoru při poklesu napětí pod 13 V a sepnutí při 13,3 V. Tím je zajištěn běh desulfátoru jen v případě, že je akumulátor nabíjen nebo plně nabit. Desulfátor je také doplněn o přepěťovou ochranu a tepelnou ochranu ve formě záporné zpětné vazby. Tepelná ochrana funguje následujícím způsobem. Termistor je připevněn na desku chladiče spolu s výkonovými součástkami a jakmile teplota přesáhne 50 °C, tak termistor sníží svůj odpor, a tím způsobí otevření tranzistoru, který zajistí snížení šířky pulzu generovaného na hradlo výkonového tranzistoru zajišťujícího spínání hlavní indukčnosti. Tento desulfátor byl publikován na serveru Wiki.MyPower.cz [24]

Dalším výkonným aktivátorem („desulfátor“) olověných akumulátorů byl publikován v časopise Amatérské Rádio v roce 2007 [29]. Tento aktivátor je schopný generovat pulzy o velikosti až 100 A každých 20 sekund. Oproti předchozím zapojením využívá tento aktivátor pouze velmi krátkých (cca 100  $\mu$ s) vybíjecích pulzů. Řídící obvod opět tvoří časovač 555, které řídí výkonový tranzistor T1. Tento tranzistor nyní neřídí vybíjení a nabíjení indukčností ale spíná odpor R13 na němž je mařena energie ze zdroje. Desulfátor opět obsahuje podpěťovou ochranu a ochranu proti přepólování.



Obr. 4.2 Aktivátor olověných akumulátorů [29]

Spíše jako zajímavost ještě uvedu využití Bediniho motoru jako desulfátoru. Princip Bediniho motoru je prostý. Když se otáčející se magnet začne přibližovat k hlavní cívce (směr pohybu je naznačen na obrázku červenou šipkou) začne se v startovacím vinutí indukovat napětí a přes odpor a diodu začne procházet pouze nepatrný proud. Následně se otáčející magnet dostane nad hlavní cívku, magnetický tok se ustálí a s ním i proud ve startovacím vinutí. Vlivem momentu setrvačnosti, ale dojde k „odtržení“ otáčejícího se magnetu od hlavní cívky a magnet se začne oddalovat. To má za následek změnu magnetického toku v jádře cívky, který vyvolá proud ve startovacím vinutí v opačném směru. Tento proud je nyní dostatečně velký, aby otevřel tranzistor, který dovolí průchod proudu přes základní vinutí a akumulátor. Dojde k plné magnetizaci jádra a postupně se ustálí i proud ve startovacím vinutí na takovou hodnotu, že donutí tranzistor zavřít. Při uzavření tranzistoru dojde k vygenerování vysokonapěťového pulzu (cca 200 V) pohybujícího se od základního vinutí ke kladné svorce akumulátoru. To má za následek dobíjení akumulátoru, který vynakládá svoji energii pro pohon otáčejících se cívek a zároveň vysokonapěťovými pulzy desulfátuje akumulátor. Tento základní Bediniho motor není příliš vhodný pro automobilové a trakční akumulátory, proto je vhodné ho rozšířit na takzvaný Bedini SSG multicoil motor, který je schopný pracovat bez problémů i na akumulátorech s kapacitou 75 Ah. [30]



Obr. 4.3 Zjednodušený náčrt Bediniho motoru

## 5 Návrh desulfátoru

### 5.1 Vybrané řešení

Všechny výše uvedené desulfátory jsou veřejně dostupné a jejich funkčnost byla již několikrát ověřena. Zejména pak Ing. Matěj Gálus provedl se svým desulfátorem několik dlouhodobých měření na akumulátorech zasažených více či méně sulfací. Výsledky měření prokázaly eliminaci sulfatace a velmi překvapivým výsledkem bylo „oživení“ hluboce vybitých zasulfátovaných olověných trakčních akumulátorů. Ovšem každý z desulfátorů má své nedostatky, mezi které patří například nemožnost měnit výstupní hodnoty proudu a frekvence po zkompletování zařízení, příliš vysoké proudové pulzy nebo příliš dlouhá doba desulfatace. Z těchto a mnoha dalších požadavků vznikl nový návrh desulfátoru.

Navržený desulfátor vychází v základní myšlence a principu z návrhu, který představil Ing. Alastair Couper. Výkonová část tedy v principu pracuje jakožto zvětšující měnič (step-up converter/boost), který převádí vstupní napětí na vyšší výstupní napětí. Ve zvětšujícím měničích dochází k periodickému spínání a rozpinání tranzistoru. Pokud je tranzistor sepnut, dojde k nabíjení induktoru energií z akumulátoru, tranzistor se následně rozpojí (dle nastavené délky trvání) a umožní naakumulovanou energii v induktoru vybití přes nulovou diodu zpět do zdroje,



tedy akumulátoru. Jelikož není tento zvyšující měnič nikterak chráněn proti zkratu, bylo nutné do návrhu zařízení zakomponovat i ochranu proti přepólování akumulátoru.

Velikost výstupního napětí měniče je funkcí střidy a lze ho vyjádřit jednoduchým vzorcem:

$$V_{out} = V_{in} \frac{T}{T - t_1} \quad (1)$$

Kde:  $V_{out}$  = výstupní napětí měniče

$V_{in}$  = vstupní napětí měniče

T = doba periody

$t_1$  = doba sepnutí tranzistoru

Vytvoření pevného potenciálu (zejména důležitého pro řídicí část) zajišťuje LC filtr v režimu dolní propusti. Navržený filtr je uspořádán pro použití až čtyřech kapacitorů, z důvodu možnosti laborování s výsledným ESR čili s výsledným sériovým odporem.

Logické jádro desulfátoru tvoří dva vhodně uspořádané časovače NE555. Časovače fungují jako celek v režimu PWM neboli v pulzně šířkové modulaci, jejíž parametry lze měnit pomocí dvou potenciometrů. První z nich pracuje jako astabilní multivibrátor, jehož frekvenci lze měnit v rozsahu 3-6 kHz. Druhý z nich pracuje jako monostabilní tvarovač pulzů s nastavitelnou šířkou pulzu. V našem případě je možnost nastavení šířky takové, aby výstupní proudové špičky byly v rozsahu 10-30 A.

Signál pro řídicí výkonový tranzistor je tedy přenášen pomocí střidy, jejíž velikost lze snadno určit dle vzorce (2).

$$D = \frac{t_{on}}{T} * 100 [\%] \quad (2)$$

Kde: D = střída

$t_{on}$  = doba spínacího pulzu

T = doba periody

Posledním větším funkčním blokem je ochrana proti přepětí a podpětí. Je zapotřebí zajistit, aby desulfátor vykonával svoji činnost, jen za předpokladu že připojený akumulátor je plně nabit nebo je právě nabíjen. Spodní hladinu napětí hlídá podpěťový odpojovač. Pro účely tohoto zařízení byl modifikován návrh zapojení od pana Miloše Zajíce [31]. Princip odpojovače je velmi prostý. Odpojovač je „řízen“ Zenerovou diodou, která po dosažení Zenerova napětí sepne signálový PNP tranzistor, kterým se následně sepne i výkonový

unipolární tranzistor a tím je umožněn průchod proudu do řídicí části zařízení. Ochranu proti vniknutí přepětí do řídicí části zajišťuje transil umístěný před odpojovačem.

Chlazení desulfátoru zajišťuje jednak pasivní chladič, na nějž jsou připevněny prvky z výkonové části, ale také ventilátor, zajišťující stálý průchod chladicího média (vzduchu) na zařízení. Ventilátor je aktivní pouze v případě, že je aktivní i řídicí část desulfátoru.

## 5.2 Návrh komponent desulfátoru

### 5.2.1 Návrh výkonové části

Ve výkonové části desulfátoru bylo zapotřebí vhodně navrhnout hlavní cívku, diodu pro vedení proudových špiček do desulfátoru, LC filtr a ochranu proti přepólování.

Při volbě indukčnosti hlavní cívky jsme vycházeli z požadavku dostupnosti induktorů na trhu, ale také z proudového omezení, jež bylo určeno na 30 A. Vzhledem k požadavkům došlo ke zvolení cívky s hodnotou 10  $\mu\text{H}$ . Pro tuto cívku bylo zvoleno železo-prachové toroidní jádro T200-26 od Amidonu, pro které bylo nutno navrhnout vinutí a také zjistit, zda nedojde při špičkové hodnotě 30 A k přesycení magnetického jádra.

Výpočet počtu závitů cívky:

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL * 10^{-3}}} = \sqrt{\frac{10 * 10^{-6}}{0,920 * 10^{-3}}} * 100 = 10,4 \text{ závitů} \quad (3)$$

Kde:  $AL$  = měrná indukčnost

$L$  = indukčnost cívky

$N$  = počet závitů cívky

Výpočet vodiče použitého pro namotání závitů:

$$d = \frac{\pi * V_{\text{nitri\_prumer}}}{N + \pi} = \frac{\pi * 31,8 * 10^{-3}}{10,4 + \pi} = 7,37 \text{ mm} \quad (4)$$

Kde:  $d$  = průměr vodiče

$V_{\text{nitri\_prumer}}$  = vnitřní průměr toroidního jádra

$N$  = počet závitů cívky

Výpočet sycení jádra:

$$H = \frac{N * I}{l} = \frac{10,4 * 30}{129,7 * 10^{-3}} = 2405,5 \text{ A/m} \quad (5)$$

$$B = \mu * H = \mu_0 * \mu_r * H = 1,2566 * 10^{-6} * 75 * 2405,5 = 0,23 \text{ T} \quad (6)$$

Kde: H = intenzita magnetického pole

I = proud cívky

l = délka závitu

$\mu_0$  = permeabilita vakua

$\mu_r$  = permeabilita jádra

B = magnetická indukce

Krajní magnetická indukce vybraného materiálu je 1,39 T, tudíž lze s jistotou tvrdit, že při špičkové hodnotě proudu 30 A nedojde k přesycení jádra cívky.

Při návrhu LC filtru jsem vycházel z dolního mezního kmitočtu, který byl stanoven na 500 Hz při dostupných variantách na trhu jsem odvodil velikost potřebné indukčnosti na přibližně 68  $\mu\text{H}$  a velikost kondenzátoru na 1500  $\mu\text{F}$ . Což lze opět podpořit následujícím výpočtem:

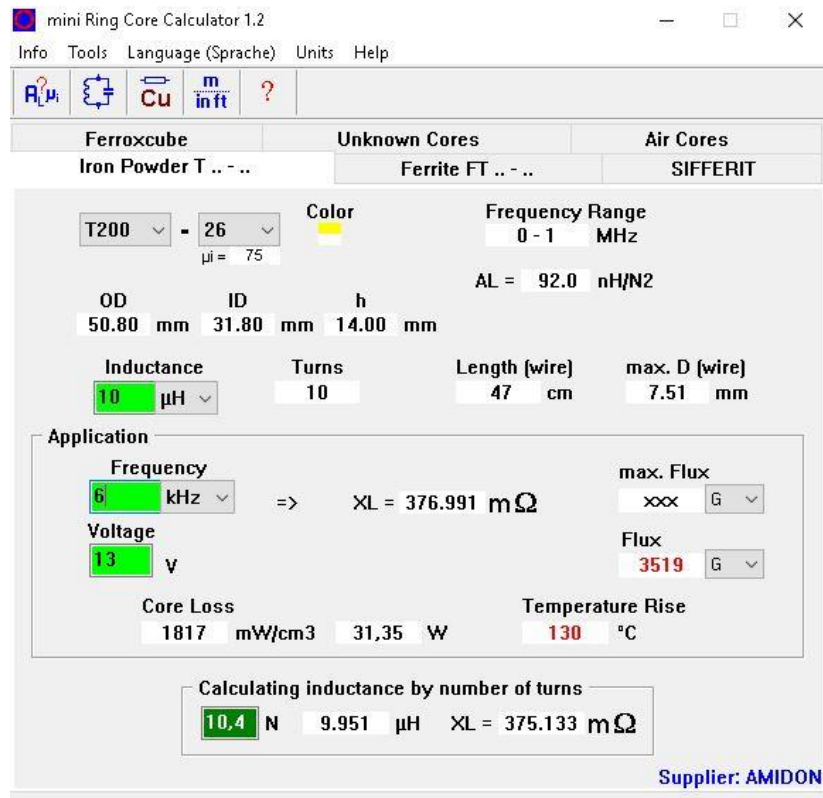
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{68 * 1500 * 10^{-6}}} = 500 \text{ Hz} \quad (7)$$

Kde: f = dolní mezní kmitočet

L = indukčnost cívky

C = kapacita kondenzátoru

Výpočet hlavní indukčnosti jsem podpořil výpočtem pomocí simulačního programu mini Ring Core Calculator (Obr. 5.1 Výpočet induktoru v programu Mini Ring Core Calculator).



Obr. 5.1 Výpočet induktoru v programu Mini Ring Core Calculator

Dioda pro zpětné vedení desulfatačního proudu do akumulátoru byla dimenzována na maximální střední hodnotu proudu, kterou je schopna trvale vydržet. Z hlediska požadavku na vyšší frekvenci spínání a nižší úbytky na přechodu byla vybrána Schottkyho dioda.

## 5.2.2 Návrh řídicí části

V řídicí části bylo zapotřebí správně nastavit kombinaci odporů, jakožto vstupních děličů napětí pro časovače NE555. První z časovačů pracuje jako astabilní multivibrátor a lze s ním řídit frekvenci v přibližném rozsahu 3-6 kHz (záleží na přesném doladění potenciometrů). Výpočet odporů pro žádanou frekvenci 3 kHz pomocí vzorce (9).

$$f = \frac{1,44}{(R1 + 2R2) * C} \rightarrow R1 = \frac{1,44}{f * C} - 2R2 \quad (8)$$

$$R1 = \frac{1,44}{3 * 10^3 * 0,01 * 10^{-6}} - 2000 = 46 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

Kde:  $f$  = frekvence

$R1+R2$  = odpory napěťového děliče

$C$  = hodnota použitého kapacitoru

Výpočet odporů pro žádanou frekvenci 6 kHz:

$$f = \frac{1,44}{(R1 + 2R2) * C} \rightarrow R1 = \frac{1,44}{f * C} - 2R2 \quad (10)$$

$$R1 = \frac{1,44}{6 * 10^3 * 0,01 * 10^{-6}} - 2 * 1000 = 22 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

Kde:  $f$  = frekvence

$R1+R2$  = odpory napěťového děliče

$C$  = hodnota použitého kapacitoru

U monostabilního tvarovače pulzů bylo zapotřebí vyřešit vhodnou šířku spínacího pulzu, tak aby proud v indukčnosti byl schopen narůst na hodnotu 10-30 A. Byly vybrány odpory 2,8 k $\Omega$  a 1,5 k $\Omega$ .

Výpočet délky spínacího pulzu pro 1,5 k $\Omega$ :

$$t = \ln(3) * CR \approx 1,099 * CR \quad (12)$$

$$t = 1,099 * 0,01 * 10^{-6} * 2500 = 27 \text{ }\mu\text{s} \quad (13)$$

Kde:  $t$  = délka spínacího pulzu

$C$  = hodnota použitého kapacitoru

$R$  = hodnota použitého odporu

Výsledkem je 27  $\mu\text{s}$ , což při kmitočtu 3 kHz odpovídá špičkovému proudu 10 A. Výpočet délky spínacího pulzu pro 2,8 k $\Omega$  a tedy při kmitočtu 6 kHz odpovídajícímu špičkovému proudu 30 A:

$$t = 1,099 * 0,01 * 10^{-6} * 3800 = 41 \text{ }\mu\text{s} \quad (14)$$

Kde:  $t$  = délka spínacího pulzu

$C$  = hodnota použitého kapacitoru

$R$  = hodnota použitého odporu

Pro odpor 2,8 k $\Omega$  byla nejbližší vhodná varianta potenciometru s odporem 5 k $\Omega$ . Zde je nutno potenciometr přesně nastavit, neboť při jeho maximální hodnotě hrozí nárůst proudu na hodnoty (špičkově zhruba 50 A), které jsou na hranici proudové únosnosti použitých součástek a DPS.

### 5.2.3 Návrh ochranné části

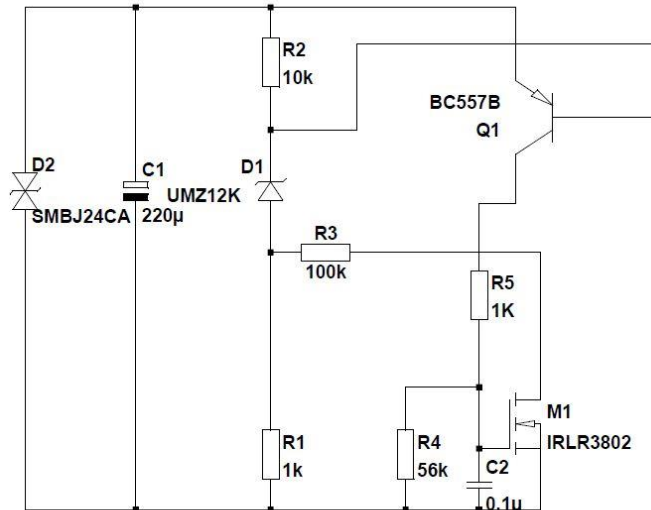
Návrh přepětové a podpětové ochrany byl proveden experimentálně pomocí simulačního programu LTspice Schematic, neboť bylo zapotřebí přesně doladit hodnoty jednotlivých odporů a vhodně zvolit Zenerovo napětí, reprezentující spodní hranici napětí akumulátoru.

## 5.3 Simulace a popis navrženého zapojení

Simulace jednotlivých částí obvodu a výsledně i kompletně zapojeného desulfátoru proběhla v programu LTspice Schematic od firmy Linear Technology. Při vytváření simulace pro desulfátor vznikly pouze problémy s chybějícími součástkami a s chybějícími knihovny na internetových stránkách, takže jsem mnohdy musel dohledávat vhodnou alternativu od firmy Linear Technology. Z toho důvodu se některé součástky liší od konečného návrhu desulfátoru vytvořeného v programu Autodesk Eagle. Kompletní schéma desulfátoru je uvedeno v příloze této práce.

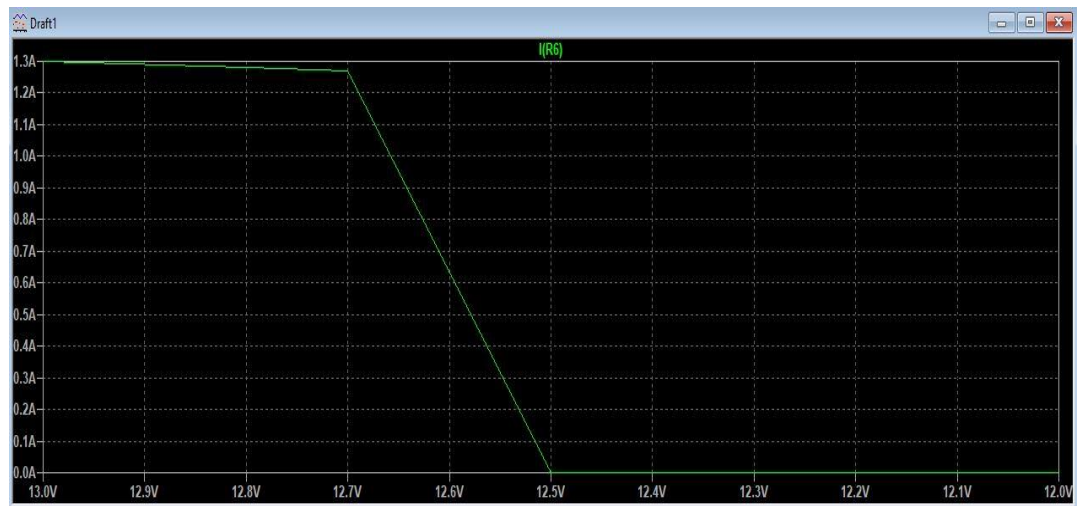
### 5.3.1 Simulace ochranné části

První z testovaných částí je blok odpojovače, jak jsem již uváděl, tento desulfátor vychází z návrhu od pana Miloše Zajíce [31], ale bylo ho nutno předělat pro mé potřeby a doplnit o některé části. Ochranný obvod tedy začíná diodou D4 a končí tranzistorem M1. Tento blok má za úkol odstranit špičky pocházející od desulfátace a stabilizovat napětí o což se snaží dvojice součástek D4 a C1. Odpojení od zdroje v případě, že napětí překročí hodnotu 15 V, což zajišťuje dioda D6, ale také odpojení od zdroje při napětí menším 12,7 V. Později při výrobě zařízení byla tato hodnota navýšena na přibližně 13 V změnou hodnoty odporu R8 na 1 k $\Omega$ . Zapojení pracuje na následujícím principu: pokud vstupní napětí překročí hodnotu Zenerovy diody (v původním návrhu pro simulaci 12 V + 0,7 V) dojde k sepnutí tranzistoru Q1 a s tím i výkonového mosfetu M1. Hodnota „spínacího“ napětí je dále doladěna odporem R8. Aby nedošlo k situaci výkonového přetížení mosfetu M1 je zde zavedena pomocí odporu R9 zpětná vazba, zajišťující skokové vypnutí/zapnutí.



Obr. 5.2 Schéma ochranné části obvodu

Stejnosměrná analýza funkce ochranné části obvodu, která odpovídá výše popsané funkci:



Obr. 5.3 Stejnosemerna analýza funkce ochranné části obvodu

### 5.3.2 Simulace řídicí části

Logické jádro desulfátoru tvoří dva časovače NE555 pracujících v režimu PWM. Parametry PWM lze měnit pomocí dvou potenciometrů (v případě simulace pomocí dvou odporů) jejichž hodnoty byly odvozeny výše. Nastavování frekvence se děje pomocí astabilního klopného obvodu, který na svém výstupu nepřetržitě střídá úrovně napětí, zapojení využívá analogového napětí z kondenzátoru C3, který je střídavě nabíjen a vybíjen po dobu, kterou určuje kombinace odporů R13 a R2.

Nabíjení a vybíjení probíhají podle vzorců:

$$t_{nabíjecí} = \ln(2) * C_3(R_{13} + R_2) \quad t_{vybijecí} = \ln(2) * C_3 * R_2 \quad (15)$$

Kde:  $t_{nabíjecí}$  = doba nabíjení

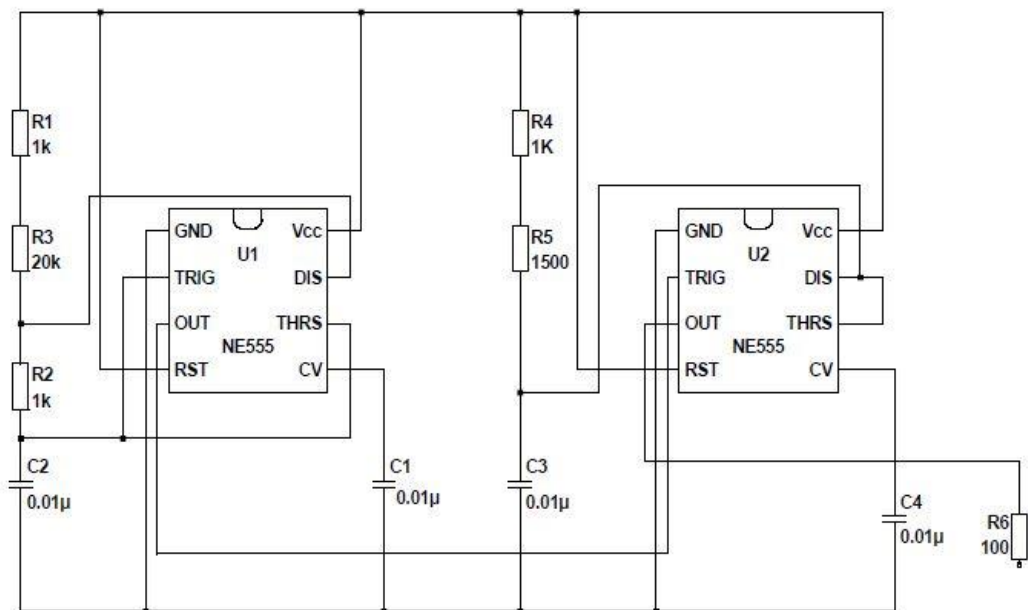
$t_{vybijecí}$  = doba vybíjení

$C_3$  = velikost kondenzátoru

$R$  = hodnoty použitých odporů

Nastavení střídý na druhém časovači, který je zapojen jako monostabilní klopný obvod (neboli jako monostabilní tvarovač pulzů) bylo uvedeno v části věnující se návrhu řídicí části desulfátoru. Tento klopný obvod má tedy jeden stabilní stav, ze kterého se do nestabilního stavu dostane po příchodu sestupné hrany na trigger. Doba, po kterou setrvá v nestabilním stavu, je opět dána dobou nabíjení kondenzátoru  $C_4$ .

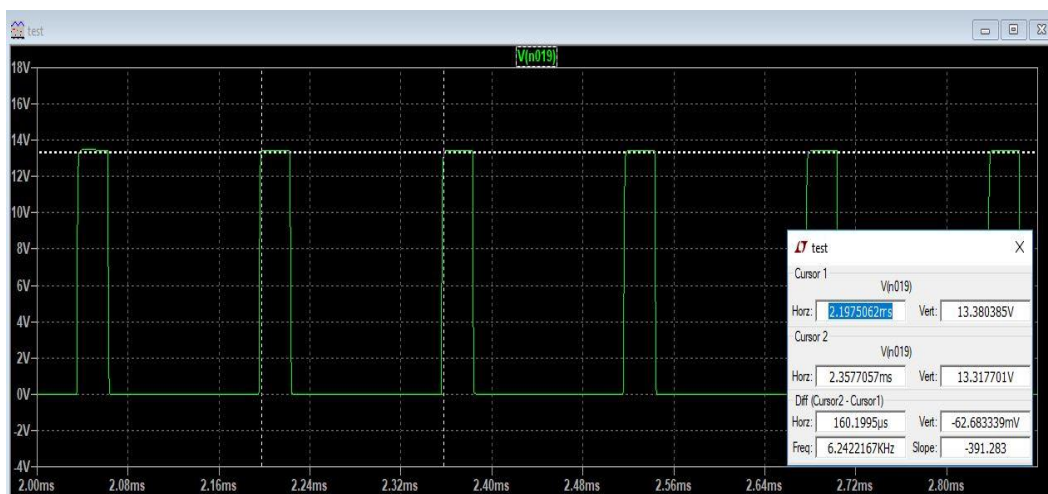
Po spojení těchto dvou logických obvodů získáme PWM regulátor stejnosměrného napětí, pomocí něhož lze velmi snadno nastavit dobu sepnutí a vypnutí výkonového tranzistoru, na jehož vstup je přiveden signál z regulátoru.



Obr. 5.4 Schéma řídicí části obvodu



Na následujícím obrázku je uvedena transientní analýza výstupu z regulátoru s ověřením nastavené frekvence a střídý.

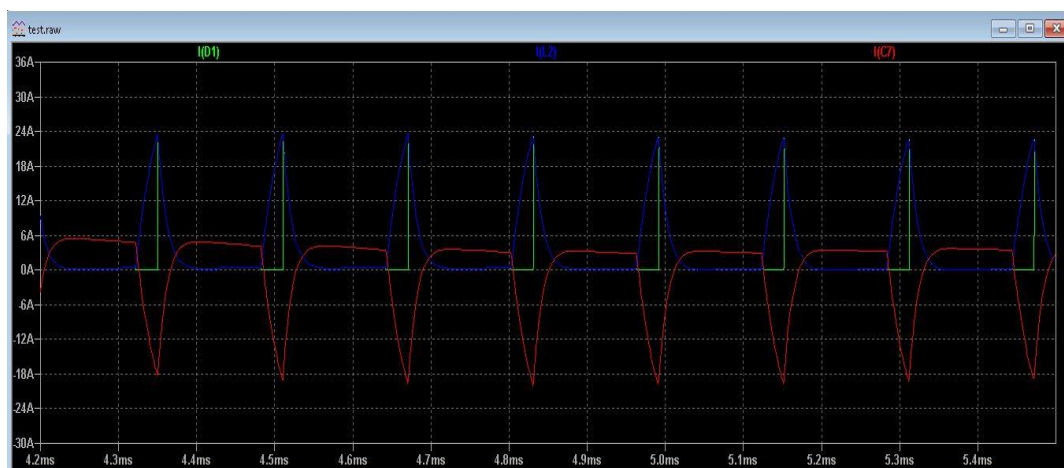


Obr. 5.5 Transientní analýza výstupu z řídicí části.

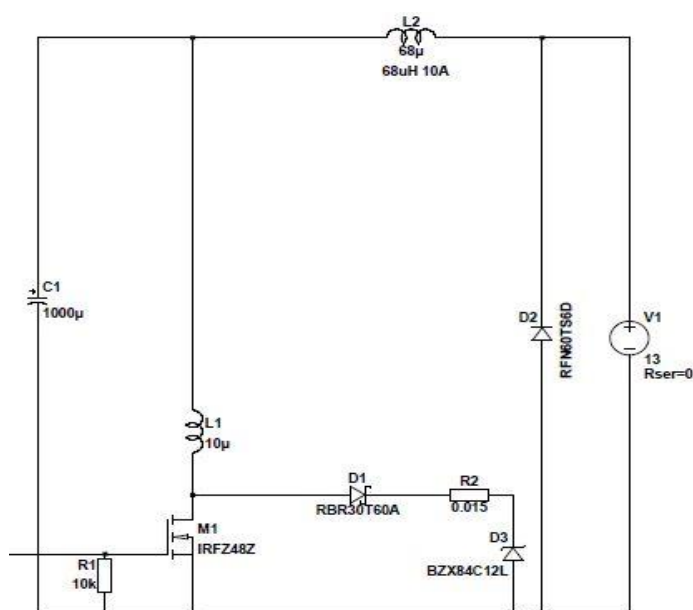
### 5.3.3 Simulace výkonové části

Výkonovou část desulfátoru tvoří dva základní, již výše představené a vypočítané prvky. Prvním z nich je LC filtr (L1 + C7) zapojený jako dolní propust, která je naladěna na mezní frekvenci o hodnotě přibližně 500 Hz. V sestaveném desulfátoru je možné tuto mez téměř libovolně posunout díky možnosti umístění většího množství paralelně řazených kondenzátorů. Druhým prvkem je zvyšující měnič tvořený prvky L2, M2, D1. V případě kladného pulzu dojde k otevření výkonového mosfetu M2 (v reálné aplikaci je pak umístěn před tímto mosfetem budič) a k nabití cívky L2 na proud 16 A (nastaveno kombinací odporů v řídicí části). Po rozpojení tranzistoru se proud vybije do kladné svorky akumulátoru přes diodu D1. V neposlední řadě je zde umístěna dioda D5, která slouží jako ochrana proti nechtěnému přepólování zařízení. Schéma tohoto zapojení je uvedeno na další straně.

Na výstupu z tranzientní analýzy jsou patrné jednak proudové pulzy vstupující do akumulátoru (zeleně) a také proud hlavní indukčnosti (modře) plus proud na filtračních kondenzátorech (červeně).



Obr. 5.6 Transientní analýza výstupu z výkonové části



Obr. 5.7 Schéma výkonové části obvodu

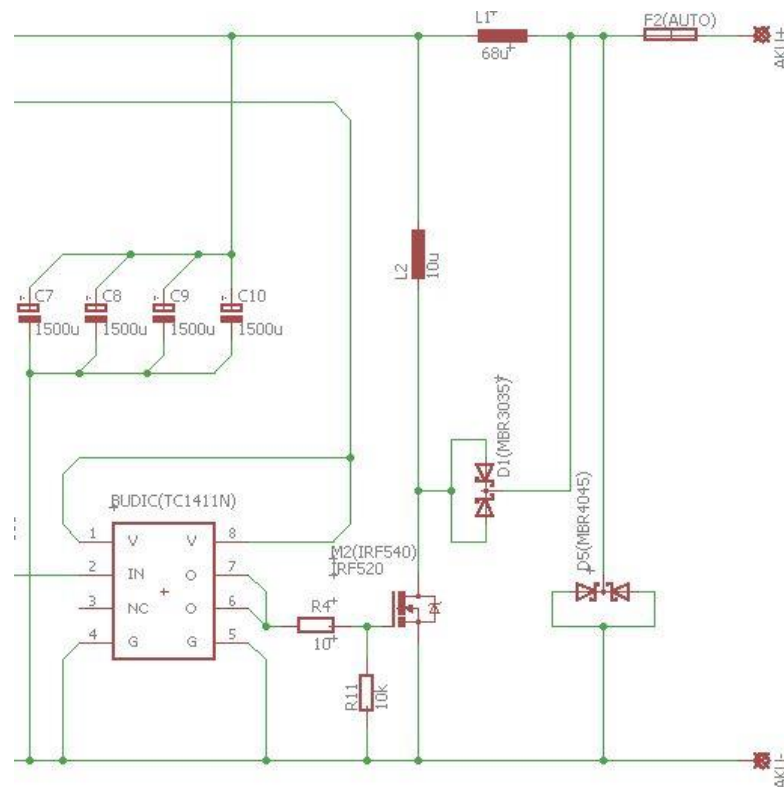
## 5.4 Návrh v Autodesk Eagle

V programu Autodesk Eagle proběhl jednak návrh finální podoby schématu, tak návrh desky plošného spoje. Kompletní schéma desulfátoru je uvedeno v příloze této práce a vzhledem k tomu, že se příliš neliší od schématu pro simulaci (přidány výstupy pro přepínače, vypínač, ventilátor a byly vyměněny odpory pro řízení regulace PWM za potenciometry) tak zde uvedu pouze část, která prošla největší změnou.

Do řídicí části tedy přibyla hned trojice kondenzátorů (C8, C9, C10), které budou později sloužit pro možné laborování s výsledným ESR a také umožní hýbat s mezní frekvencí LC filtru. Přidán byl rovněž budič pro mosfet M2. Tento budič nám zajistí dostatečné proudové zesílení signálu z PWM regulátoru, přibližně z 200 mA na 1 A. Budič je zde přidám především z důvodu nabíjení kapacity  $C_{GS}$ . Dále byl přidán odpor R4, který ovlivňuje strmost spínání

tranzistoru M2. Pull-down rezistor R11 je ve schématu uveden z důvodu eliminace samovolného sepnutí tranzistoru M2 při nechtěném nabití gatu například statickou elektřinou.

Poslední úpravou bylo přidání pojistky, respektive pouzdra pro automobilovou nožovou pojistku, která v případě přepólování akumulátoru vybaví a odpojí tak desulfátor od akumulátoru. Ideální velikost této pojistky je, vzhledem k velikosti proudových impulzů, 30 A.

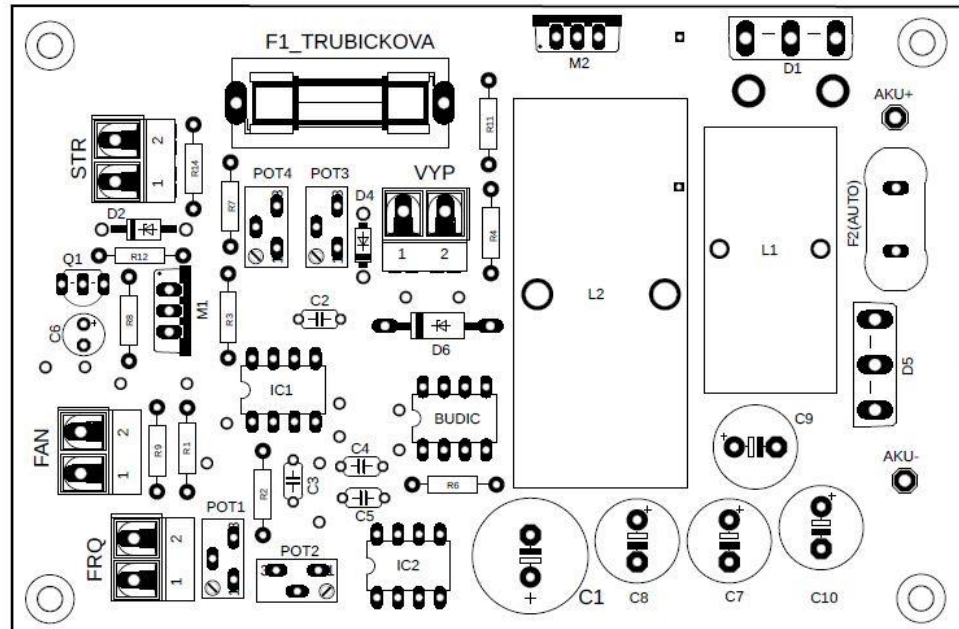


Obr. 5.8 Schéma výkonové části obvodu v programu Autodesk Eagle

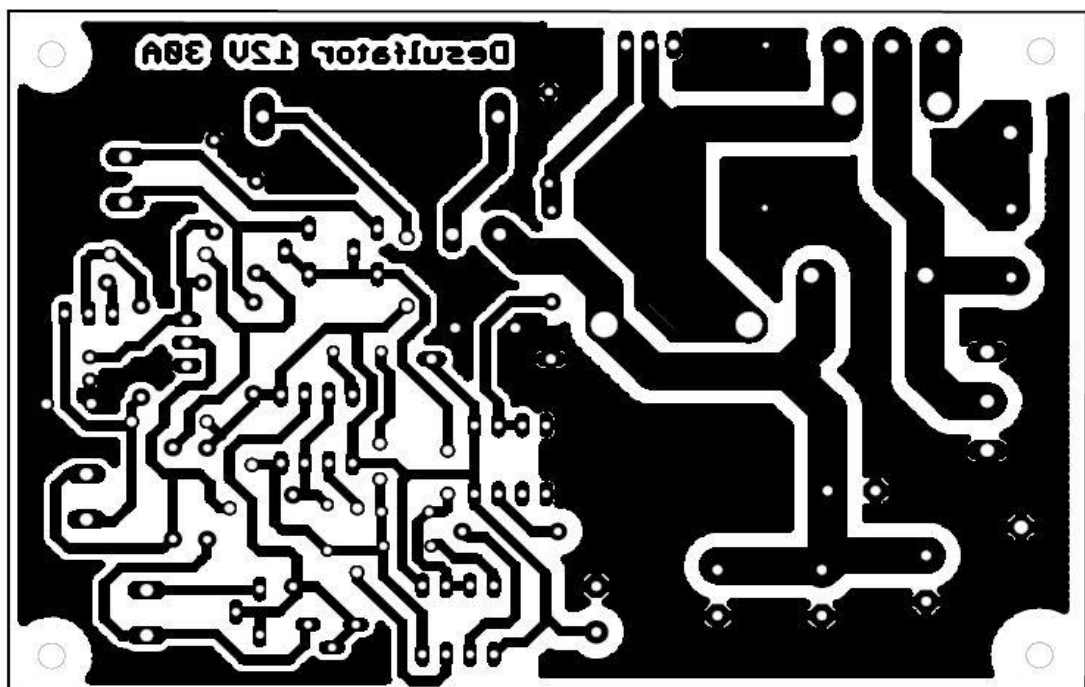
#### 5.4.1 Deska plošného spoje (DPS)

Základním podmínkou pro tvorbu plošného spoje bylo velikostní omezení, které bylo stanoveno na 15 x 13 cm z důvodu umístění spolu s chladičem do již vytvořeného instalačního boxu. Dále bylo nutné součástky M2 a D1 umístit na okraj desky, tak aby bylo možné jejich pouzdra pohodlně přišroubovat na desku chladiče. Ve výkonové části bylo nutné, vzhledem k velikosti procházejícího proudu, navrhnout vodivé cesty alespoň 4 mm silné (více už nedovolují mechanické parametry součástek) a ty při výrobě následně posílit pocínováním. V ostatních částech DPS jsou navrženy vodivé cesty o tloušťce 1 mm. Veškeré vodivé cesty vedoucí od záporné svorky akumulátoru byly vytvořeny pomocí polygonu tak, aby se v co největší míře využila měděná vodivá vrstva desky. Deska obsahuje několik vodivých drátových spojů, šířku těchto spojů je nutno dimenzovat s ohledem na protékající proud.

Na desce plošného spoje jsou umístěny čtyři svorkovnice. Svorkovnice mají následující účely: VYP = určena pro připojení externího vypínače desulfátoru, FAN = připojení externího ventilátoru, FRQ = připojení externího přepínače mezi nastavenými frekvencemi, STR = připojení externího přepínače mezi nastavenými frekvencemi.



Obr. 5.9 Návrh rozmístění součástek na desce plošného spoje

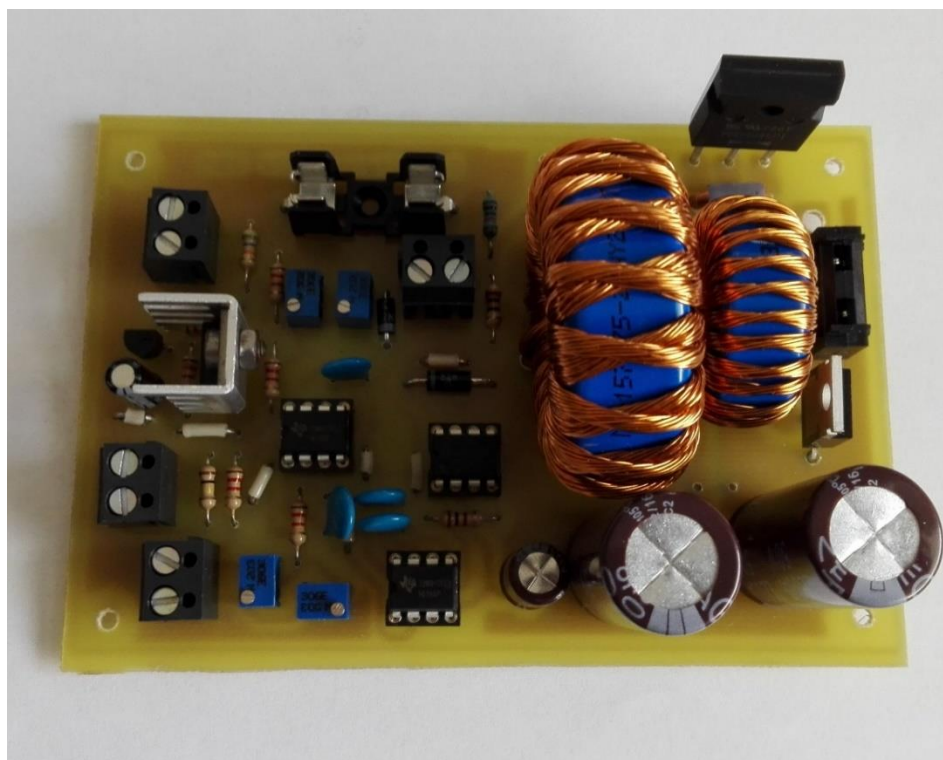


Obr. 5.10 Návrh realizace vodivých cest na desce plošného spoje

## 6 Výroba desulfátoru

Desku plošného spoje jsem vyrobil pomocí nažehlovací metody. Tato metoda spočívá v natištění motivu desky pomocí toneru laserové tiskárny na křídový papír (lze použít i barevný lepící papír) ideálně s co nejvyšší kvalitou tisku. Poté se na odmaštěnou cuprexitovou desku položí vytištěný návrh (tonerem na měděnou vrstvu desky) a začneme s nažehlováním, ideálně s nastavenou nižší teplotou žehličky. S nažehlováním přestaneme ve chvíli, kdy se toner přilepí na desku. Desku následně vložíme do misky s vodou a volně odstraníme zbylý křídový papír. Takto nanesený toner na desce už stačí jen vyleptat v roztoku chloridu železitého a vhodně potřít vrstvou kalafuny, která umožní snadnější kontakt cínu při pájení.

Desku plošného spoje jsem následně odvrstal a začal osazovat součástkami (seznam součástek uveden v příloze práce) začínaje nejmenšími, kterými jsou rezistory, diody a drátové propojky. Následně jsem osadil zbytek řídicího obvodu (patice pro integrované obvody, tranzistory, potenciometry a mnohé další). Poslední na řadu přišla výkonová část desulfátoru. Ve výkonové části nebylo zapotřebí řešit namotání toroidních jader, dle návrhu, neboť jsem na trhu dohledal již hotové cívky s téměř totožnými parametry, ale za daleko nižší pořizovací cenu. Kondenzátory pro LC filtr jsem se rozhodl před testováním osadit dva, z důvodu lepšího proudového zatížení kondenzátorů, než kdyby byl umístěn na DPS pouze jeden, jak bylo v původním návrhu.

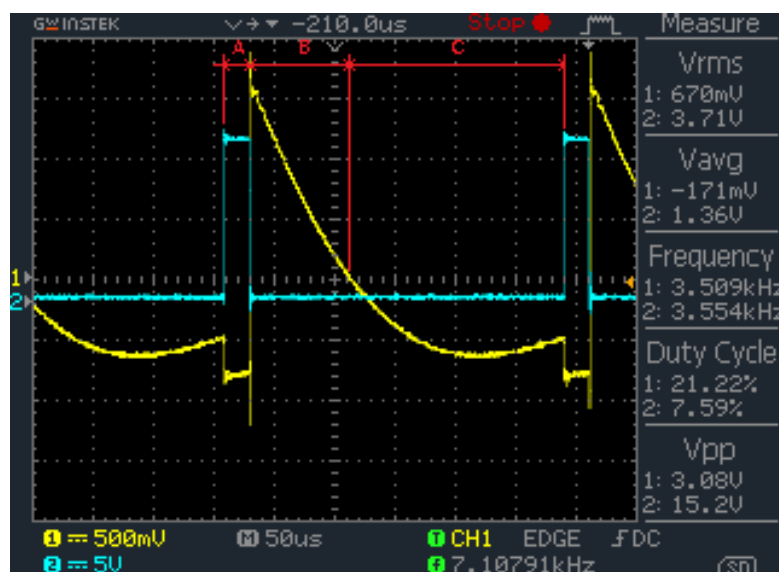


Obr. 6.1 Fotografie osazeného desulfátoru před oživením.

## 6.1 Ožívání desulfátoru

Při ožívání desulfátoru se přirozeně vyskytlo několik menších či větších problémů, které bylo zapotřebí vyřešit před uvedením do provozu. Prvně byl zapotřebí dořešit rozdílnost potenciálů na pouzdře u mosfetu M2 a diody D1. Řešením bylo použití slídové izolační podložky mezi pouzdro tranzistoru a chladič. Po prvním připojení fungujícího desulfátoru bylo patrné, že proudové pulzy vstupující do akumulátoru jsou utlumené a plné šumu. Následovalo ladění cívky LC filtru a hlavní indukčnosti. Nyní je velikost hlavní cívky (L2) 9  $\mu\text{H}$ , filtrační (L1) přibližně 100  $\mu\text{H}$  a hodnota kondenzátoru ve filtru je 1000  $\mu\text{F}$  (Instalován je 3 x 330  $\mu\text{F}$  low ESR kondenzátor). Další výrazný problém nastal při sepnutí podpěťové ochrany pod zátěží. Při rozpojení se rozdělí země mezi časovači NE555 a budičem mosfetu. Vznikne tak nedefinovaný stav a tranzistor M2 se na okamžik samovolně otevře. Dojde tak k tvrdému zkratu a ke zničení tranzistoru. U testovací verze bylo tedy zapotřebí obejít podpěťovou ochranu a při výrobě další verze desulfátoru bude zapotřebí připojit zemnicí piny budiče na společnou zem časovačů a podpěťové ochrany.

Po úspěšném oživení byl desulfátor připojen na akumulátor a proběhla analýza jeho funkčnosti pomocí osciloskopu. Na oscilogramu je žlutě zobrazen průběh desulfatačního proudu, který vstupuje do akumulátoru a tyrkysově napětí na gate tranzistoru M2 (IRF540). V prvním červeně zvýrazněném kvadrantu A dochází k otevření tranzistoru M2, a tedy k nabíjení hlavní indukčnosti, následně se tranzistor zavře a přejdeme do kvadrantu B, který začíná vysokým proudovým pulsem o velikosti 30,8 A. Během doby jeho trvání dochází k vybíjení indukčnosti z induktoru do akumulátoru. Po průchodu desulfatačního proudu 0 začíná kvadrant C, během kterého se energie z induktoru vybíjí do filtračních kondenzátorů.



Obr. 6.2 Oscilogram průběhu výstupního proudu desulfátoru a napětí na gate M2

## 7 Test desulfátoru

Po úspěšném oživení desulfátoru započalo testování na akumulátoru zasaženém sulfatací. Jednalo se o automobilový akumulátor VARTA, 50 Ah, 420 A EN. Štítkové číslo akumulátoru: 7701376963. Tento akumulátor byl z aktivní služby ve vozidle Renault odstaven před více než rokem, a od té doby nebyl silně zasulfátovaný akumulátor použit ani dobíjen. Před počátkem desulfatace proběhlo měření na akumulátoru, kde byly zjištěny dvě základní inkriminované veličiny akumulátoru. První z nich je vnitřní odpor, jedná se o veličinu, která by měla být ideálně co nejmenší, tak aby byl akumulátor schopen dodat co nejvyšší možný proud bez poklesu svorkového napětí. Měření vnitřního odporu akumulátoru proběhlo pomocí měřicího přístroje SM8124, který ukázal hodnotu vnitřního odporu akumulátoru na 10,8 mΩ. Druhou sledovanou veličinou byla kapacita akumulátoru, čím větší je tato veličina, tím více je akumulátor schopen energie akumulovat a následně vydat. Kapacita akumulátoru byla změřena pomocí testeru bateriové kapacity FDY10 a vyšla při prvním měření na 13 Ah. Desulfátor, nastavený na špičkovou hodnotu desulfatačního proudu 30 A a frekvenci 3,5 kHz běžel nepřetržitě připojený ke svorkám akumulátoru týden (přesněji 6dní). Po týdnu proběhlo kontrolní měření tížených veličin, které nejlépe poukazují na míru sulfatace. Vnitřní odpor akumulátoru klesl z 10,8 mΩ na 10,6 mΩ. Kapacita akumulátoru vzrostla z 13 Ah na 13,3 Ah. Zaznamenali jsme tedy po týdenním měření pokles vnitřního odporu akumulátoru o 0,2 mΩ, což procentuálně vychází na zlepšení o 1,8 %. Kapacita vzrostla o 0,3 Ah, což vychází na zlepšení o 2,3 %.

Měření proběhlo při okolní teplotě 20 °C a akumulátor byl připojen na stejnosměrný stabilizovaný zdroj s nastaveným napětím 14 V. Byl změřen také odběrový proud desulfátoru, který činí 1,8 A při 13,8 V, což činí příkon desulfátoru téměř 25 W. Desulfátor má oproti některým jiným komerčním zapojením regenerátoru vyšší příkon, s kterým je vhodné počítat zejména při dlouhodobé desulfataci.

## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámení se s problematikou degradace olověných akumulátor, objasnění sulfatace a prevence proti sulfataci. Hlavním výstupem práce je zpracované funkční zařízení na regeneraci olověných akumulátorů.

Vzhledem k požadavkům byla práce rozdělena do třech větších částí. První část se zabývá seznámením s konstrukcí a fungováním olověných akumulátorů. Tato část bakalářské práce volně přechází do části věnované problematice degradace olověných akumulátorů, kde je nezanedbatelná část věnována prevenci proti sulfataci akumulátoru. Nejdůležitější částí této bakalářské práce je poté návrh, simulace návrhu, výroba a funkční test vlastního zařízení sloužícího k regeneraci olověných akumulátorů.

Výsledkem celé práce je tedy navržené, odsimulované a vyrobené funkční zařízení, které jak prokázal test, je schopno regenerovat olověné akumulátory. Celé zařízení je již od návrhu ovlivněno požadavkem na umístění v předem připraveném instalačním boxu, kde bude desulfátor svou funkcí doplňovat jeden velký funkční celek. Z toho důvodu je desulfátor osazen několika svorkovnicemi, které tvoří vstupy a výstupy pro externí zařízení uvedené v seznamu součástí.

I přesto, že byla funkčnost zařízení prokázána tak test desulfatace není v tuto chvíli nikterak přesvědčivý, což ale přisuzuji stáří testovaného akumulátoru (více jak 10let) a míře sulfatace. Možné zlepšení v rychlosti desulfatace, bychom zajisté dosáhli laborováním a experimentováním s nastavitelnými výstupními parametry desulfátoru, tedy s velikostí špičkové hodnoty proudu a s velikostí desulfatační frekvence. S největší pravděpodobností bychom zlepšení také dosáhli, pokud bychom použili akumulátor mladšího data výroby.



## Seznam použité literatury

- [1] BOHÁČOVÁ, Margita. Principy (59.) Tajemství vzniku napětí v galvanickém článku. In: *Elektrika.cz* [online]. 1.12.2004 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2005-05-10.4911115209>
- [2] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]. 20. prosince 2008, 10-11 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf)
- [3] POŠTA, Josef a Bohuslav PETERK. Konstrukce, provoz a údržba akumulátorů aneb prodlužte životnost vaší baterie. In: *Stavební technika* [online]. 5. 8. 2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/konstrukce-provoz-a-udrzba-akumulatoru-aneb-prodluzte-zivotnost-vasi-baterie>
- [4] HLAVÁČ, Pavel. *FORMACE OLOVĚNÉHO AKUMULÁTORU* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=69849](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69849). Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. SEBASTIAN VACULÍK.
- [5] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]. 20. prosince 2008, 14 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf)
- [6] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]. 20. prosince 2008, 12-13 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf)
- [7] In: *DC Battery Specialists* [online]. Miami, Florida [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [https://www.dcbattery.com/lifeline\\_agm\\_gel\\_life\\_cycle\\_comp.html](https://www.dcbattery.com/lifeline_agm_gel_life_cycle_comp.html)
- [8] *Průvodce světem olověných akumulátorů: Srovnání důležitých vlastností jednotlivých typů akumulátorů* [online]. 3-4 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.nabijecky-obchod.cz/dokumenty/document8897310.pdf>
- [9] *Průvodce světem olověných akumulátorů: Srovnání důležitých vlastností jednotlivých typů akumulátorů* [online]. 2-3 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.nabijecky-obchod.cz/dokumenty/document8897310.pdf>
- [10] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]. 20. prosince 2008, 26-28 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf)

- [11] MORAVEC, Stanislav. ELEKTROCHEMICKÉ ZDROJE: Olověné akumulátory. *SPŠE-slaboproud*[online]. Plzeň, 1.6.2001 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://slaboproud.sweb.cz/elt2/stranky1/elt031.htm>
- [12] TICHÝ, Jiří. *Lithiové akumulátory: Přehled základních typů a jejich vlastností* [online]. Brno, 2015, 21.12.2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [13] SADÍLEK, Ondřej. *Akumulátory energie – přehled vybraných typů článků pro trakční účely: ČÁST II*. UNIVERZITA PARDUBICE, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [14] REDAKCE. *Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část)* [online]. Praha: Mladá fronta, 15.4.2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>
- [15] CEKL, Tomáš. Lithiové akumulátory velkých výkonů a jejich použití. *ELEKTRO* [online]. Elektrotechnická fakulta ČVUT v Praze, 2005, **2005**(12) [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/lithiove-akumulatory-velkych-vykonu-a-jejich-pouziti--13384>
- [16] JANÁK, Jakub. *Regenerace olověných akumulátorů* [online]. Praha, 2014 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/25051/F3-DP-2014-Janak-Jakub-prace.pdf>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
- [17] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]. 20. prosince 2008, 29-32 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf)
- [18] HLAVÁČ. *FORMACE OLOVĚNÉHO AKUMULÁTORU* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=69849](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69849). Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. SEBASTIAN VACULÍK.
- [19] ABRAHAM, P., P. BAČA a P. TOŠER. Nabíjení akumulátorů pomocí pulzních technik. *Electro scope* [online]. Brno, 2012, **2012**(IV), 1-3 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/701/1/r6c4c1.pdf>
- [20] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]. 20. prosince 2008, 21 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf)
- [21] HAMMERBAUER, Jiří. *Olověné akumulátory* [online]. , 52 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>

- [22] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]. 20. prosince 2008, 23-25 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf)
- [23] PAVLŮ, M. *Degradační mechanismy u olověných akumulátorů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=59312](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59312). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
- [24] GÁLUS, Matěj. Desulfatace – obnova kapacity Pb aku aneb Nehaž olovo do žita !. *Wiki.MyPower.CZ* [online]. 3.4.2012 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://wiki.mypower.cz/desulfatace>
- [25] Avoid Battery Sulfation. In: *Battery Minder* [online]. Huntington, NY 11743, 2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.batteryminders.com/avoid-battery-sulfation/>
- [26] LÁBUS, Radek. *OPTIMALIZACE UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=95743](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=95743). ZKRÁCENÁ VERZE DOKTORSKÉ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. PETR KŘIVÍK, PH.D.
- [27] BAČA, Petr. *STUDIUM JEDNOTLIVÝCH FOREM PŘEDČASNÉ ZTRÁTY KAPACITY BEZÚDRŽBOVÝCH OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ VRLA* [online]. Brno, 2007 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3519-3.pdf>. Zkrácená verze habilitační práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [28] COUPER, Alastair. Lead-Acid Battery Desulfator. *Homebrew* [online]. 2000, **June / July 2000**(#77), 1-4 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.homepower.com/view/?file=HP77\\_pg84\\_Couper](https://www.homepower.com/view/?file=HP77_pg84_Couper)
- [29] *Praktická elektronika - Amatérské Radio: Aktivátor olověných akumulátorů*. Praha: Amaro spol. s r.o., 2007, **2007**(3).
- [30] H., Igor. *Bediniho generátor. Principy práce. Část 1* [online]. 21. května 2015 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://allatra-science.org/cs/publication/generator-bedini>
- [31] ZAJÍC, Miloš. Odpojovač zátěže při podpětí. *Miloš Zajíc elektronické stavebnice a moduly*[online]. PEČKY [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.zajic.cz/odpojovac/odpojovac.htm>

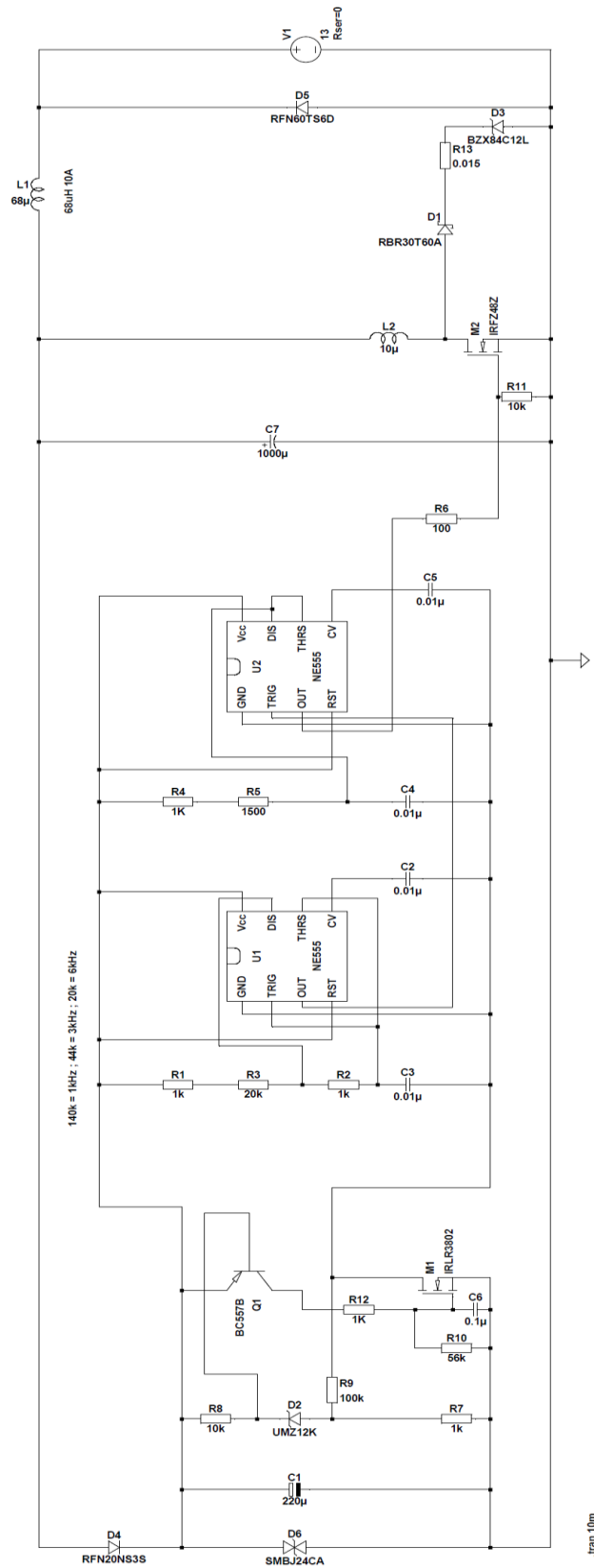
## Seznam obrázků

Obr. 1.1 Konstrukce olověného automobilového akumulátoru [3] .....	12
Obr. 1.2 jedno a dvou kuličkový hustoměr [2] .....	13
Obr. 1.3 Srovnání životního cyklu gelového a AGM akumulátoru [7] .....	15
Obr. 1.4 Chemické procesy znázorněné obrázkem.....	17
Obr. 2.1 Nabíjecí charakteristika typu U .....	21
Obr. 2.2 Nabíjecí charakteristika typu I.....	21
Obr. 2.3 Nabíjecí charakteristika typu W .....	22
Obr. 2.4 Nabíjecí charakteristika typu IU .....	22
Obr. 2.5 Ukázka průběhu napětí na článku při použitém pulzním režimu [19].....	23
Obr. 2.6 Typické vybíjecí křivky při teplotě 20 °C [21].....	24
Obr. 2.7 Typické vybíjecí křivky při teplotě 0 °C [21].....	25
Obr. 3.1 Detail na elektrody zasažené sulfatací a detail po desulfataci [25] .....	27
Obr. 3.2 Závislost kapacity na životnosti olověného akumulátoru [27] .....	28
Obr. 4.1 Desulfátor (12 V) publikovaný Alastairenem Couperem [28] .....	29
Obr. 4.2 Aktivátor olověných akumulátorů [29].....	31
Obr. 4.3 Zjednodušený nákres Bediniho motoru .....	32
Obr. 5.1 Výpočet induktoru v programu Mini Ring Core Calculator.....	36
Obr. 5.2 Schéma ochranné části obvodu.....	39
Obr. 5.3 Stejnoseměrná analýza funkce ochranné části obvodu.....	39
Obr. 5.4 Schéma řídicí části obvodu .....	40
Obr. 5.5 Transientní analýza výstupu z řídicí části.....	41
Obr. 5.6 Transientní analýza výstupu z výkonové části .....	42
Obr. 5.7 Schéma výkonové části obvodu.....	42
Obr. 5.8 Schéma výkonové části obvodu v programu Autodesk Eagle.....	43
Obr. 5.9 Návrh rozmístění součástek na desce plošného spoje .....	44
Obr. 5.10 Návrh realizace vodivých cest na desce plošného spoje.....	44
Obr. 6.1 Fotografie osazeného desulfátoru před oživením. ....	45
Obr. 6.2 Oscilogram průběhu výstupního proudu desulfátoru a napětí na gatu M2 .....	46

## **Seznam příloh**

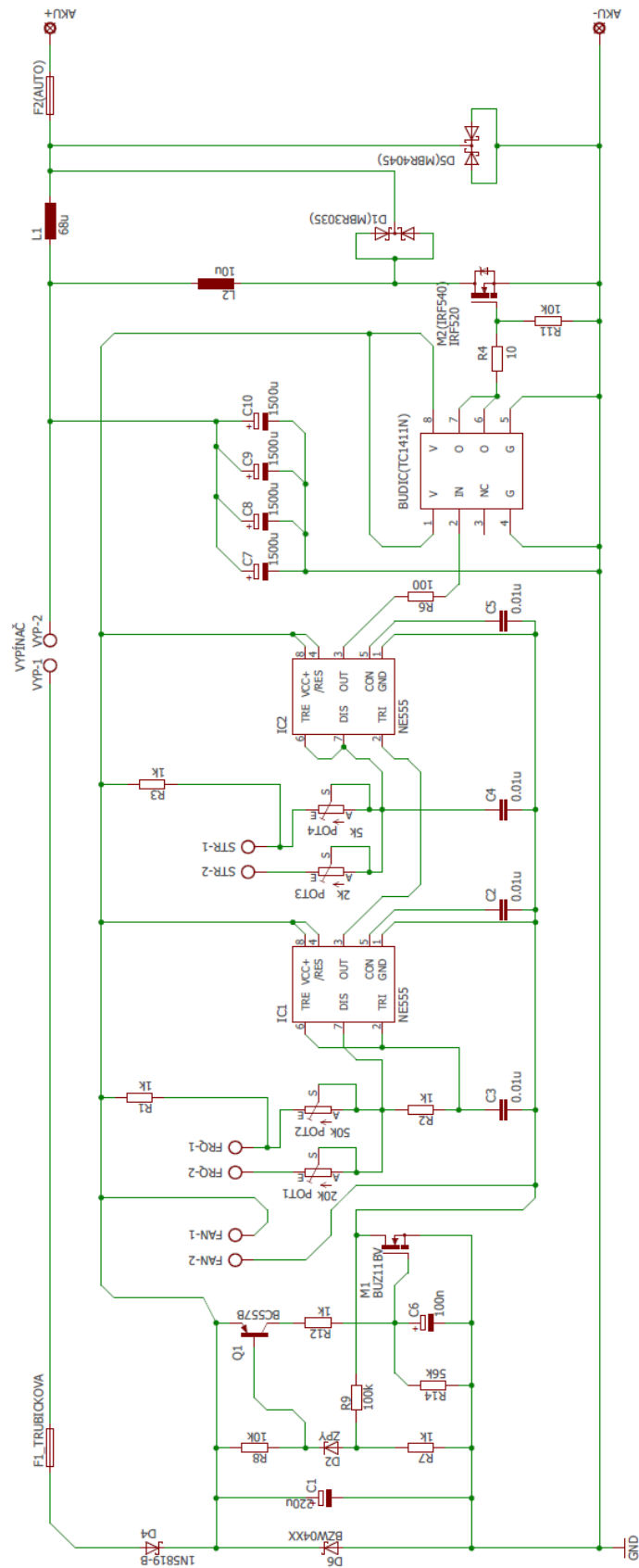
Příloha A – Schéma simulace navrženého zapojení desulfátoru .....	54
Příloha B – Kompletní schéma zapojení navrženého desulfátoru .....	55
Příloha C – Seznam součástí pro regenerátor.....	56

## Příloha A – Schéma simulace navrženého zapojení desulfátoru



Příloha A – Schéma simulace navrženého zapojení desulfátoru

## Příloha B – Kompletní schéma zapojení navrženého desulfátoru



Příloha B – Kompletní schéma zapojení navrženého desulfátoru

## Příloha C – Seznam součástek pro regenerátor

Součástka	Kód součástky	Typ součástky
D1	Dioda MBR3060PT	schottky
D2	Dioda ZPY12	zenerova
D4	Dioda SR260	schottky
D5	Dioda MBR4045PT C0	schottky
TVS (D6)	Transil BZW06-14	jednosměrný
M1	Tranzistor BUZ11_NR4941	unipolární
M2	Tranzistor IRFZ48N_TO220AB	unipolární
Q1	Tranzistor BC556B	bipolární
C1	Kondenzátor CE 220u/16VT	elektrolytický
C2	Kondenzátor CCK-10N	keramický
C3	Kondenzátor CCK-10N	keramický
C4	Kondenzátor CCK-10N	keramický
C5	Kondenzátor CCK-10N	keramický
C6	Kondenzátor UVZ2A0R1MDD	elektrolytický
C7	Kondenzátor CE 1500u/16VIT	elektrolytický
R1	Rezistor MBB02070C1001FCT00	vrstvý
R2	Rezistor MBB02070C1001FCT00	vrstvý
R3 (3kHz)	Potenciometr T67W-50K	víceotáčkový
R3 (6 kHz)	Potenciometr T67W-20K	víceotáčkový
R4	Rezistor MBB02070C1001FCT00	vrstvý
R5 (STR)	Potenciometr T67W-5K	víceotáčkový
R5 (STR)	Potenciometr T67W-2K	víceotáčkový
R6	Rezistor MBB02070C1000FCT00	vrstvý
R7	Rezistor MBB02070C1001FCT00	vrstvý
R8	Rezistor MBB02070C1002FCT00	vrstvý
R9	Rezistor MBB02070C1003FCT00	vrstvý
R10	Rezistor MBB02070C5602FCT00	vrstvý
R11	Rezistor MBB02070C1002FCT00	vrstvý
R12	Rezistor MBB02070C1001FCT00	vrstvý
U1	Periferní obvod NE555P	astabilní, monostabilní, RC časovač
U2	Periferní obvod NE555P	astabilní, monostabilní, RC časovač
Držák pojistek	Pouzdro SCHURTER 0031.8211	trubičkové pojistky
Držák autopojistek	Pouzdro LITTELFUSE 01530008Z	automobilové pojistky
Pojistka	Pojistka F 200mA 5x20	trubičková
Pojistka č.2	Autopojistka pojistka 633-275	standard 25A
PATICE [3x]	Patice ADAM TECH ICM-308-1-GT	pozlacené piny
Ventilátor	SUNON MB60251V3-A99	DC axiální
Budič mosfetu	TC1411NCPA	budič mosfetů
L1	DTMSS-40/0.1/20-V	vinutá prstencová
L2	DTMSS-27/0.068/10-V	vinutá prstencová
Svorkovnice [4x]	TB-5.0-K45-2/BL	do polšného spoje

Příloha C – Seznam součástek pro regenerátor