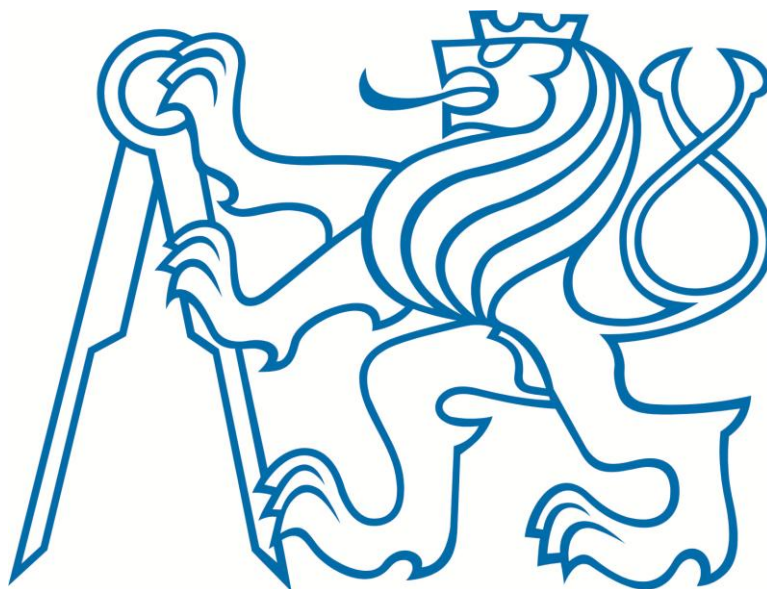


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

System dlouhodobého bezúdržbového zálohování  
s olověnými akumulátory

Autor: Bc. Andrej Čižmár

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

Praha, 2016



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Andrej Čižmár**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**  
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Systém dlouhodobého bezúdržbového zálohování s olověnými akumulátory**

Název tématu anglicky: **Longterm Maintenance Free Lead Acid Battery Backup System**

### Pokyny pro vypracování:

Analyzujte požadavky kladené na systém pro dlouhodobé a bezúdržbové zálohování napájení drážního zabezpečovacího systému olověnými akumulátory. Navrhněte a prakticky ověřte metody pro nabíjení akumulátorů za provozu a diagnostikování jejich stavu. Proveďte rozbor možností simulace životního cyklu akumulátoru. Navržené metody prakticky ověřte a proveďte diskuzi výsledků. Posuďte možnost realizace systému s využitím mikrořadičů řady STM32F4xx.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Yiu, J.: Definitive Guide to ARM CortexR-M3 and CortexR-M4 Processors
- [2] STMicroelectronics: RM0090 Reference manual
- [3] Kolektiv aut.: Akumulátory od principu k praxi, FCC Public, 2003, ISBN 80-86534-03-0

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Fischer, CSc.**

Datum zadání diplomové práce: **14. prosince 2015**

Platnost zadání do<sup>1</sup>: **30. září 2017**



Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Rípků, CSc.  
děkan

V Praze dne 14. 12. 2015

<sup>1</sup> Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací jednotlivých metod potřebných pro zálohovací systém napájení s olověnými akumulátory. Jedná se především o aplikaci vhodných nabíjecích algoritmů a diagnostických postupů. Pro ověření navržených metod byla realizována nabíjecí jednotka s mikroprocesorem řady STM32F4xx, s implementovanými obvody pro měření potřebných veličin. Dále jsou v této práci zpracovány výsledky jednotlivých měření na olověných akumulátorech.

## **Annotation**

This master thesis deals with design and realization of methods, which are needed for back-up system with lead acid batteries. Especially, it is about application of suitable charging algorithms and diagnostic procedures. For verification of designed methods was realized charging unit with microprocessor from STM32F4xx series and with implemented circuits for measuring needed parameters. In this thesis are also processed results from each measurement on lead acid batteries.

## Čestné prohlášení autora práce

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

V Praze dne .....

.....

Podpis autora práce

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Janu Fischerovi, Csc. za vstřícnost a neúnavnost při mém vedení. Dále bych chtěl poděkovat všem kolegům z firmy Siemens s.r.o., a také za možnost realizovat toto téma. Dále také děkuji své přítelkyni a rodině za trpělivou pomoc při mém vysokoškolském studiu.

# Obsah

1. Úvod.....	1
2. Rozbor zadání .....	3
2.1 Zálohovací systémy elektronických zařízení .....	3
2.1.1 Zálohovací koncepty elektronických systémů .....	3
2.2 Popis olověných akumulátorů a kritérií pro jejich výběr .....	8
2.2.1 Typy olověných akumulátorů a jejich vhodný výběr.....	8
2.2.2 Základní parametry olověných akumulátorů .....	14
2.2.3 Přehled nabíjecích algoritmů/přehled metod nabíjení akumulátorů .....	19
2.3 Rozbor diagnostických metod olověných akumulátorů.....	23
2.3.1 Popis jednotlivých možností diagnostikování stavu olověných akumulátorů .....	23
2.3.2 Měření parametrů olověných akumulátorů pro diagnostiku jejich stavu.....	26
2.3.3 Měření životního cyklu a jeho simulace .....	29
2.4 Shrnutí požadavků pro realizaci zadání .....	31
3. Řešení modulu pro testování požadavků zálohovacího systému .....	32
3.1 Koncepce modulu olověných baterií.....	32
3.1.1 Bloková schémata modulu olověných akumulátorů .....	33
3.2 Návrh obvodu pro měření proudu .....	35
3.2.1 Návrh a výpočet základního obvodu pro měření proudu .....	35
3.2.2 Výpočet výstupního šumu hlavního obvodu měření proudu .....	41
3.2.3 Návrh a výpočet alternativního obvodu měření proudu.....	45
3.3 Návrh obvodu pro měření napětí .....	47
3.4 Návrh obvodu pro měření teploty .....	53
3.5 Návrh obvodu nabíjecího zdroje proudu a napětí .....	56
3.5.1 Návrh a výpočet obvodu nabíjecího zdroje.....	56
3.5.2 Popis implementace regulační smyčky nabíjecího zdroje .....	60
3.6 Popis obvodu pro vybíjení olověných akumulátorů .....	61
3.7 Popis digitálního jádra modulu .....	62
3.8 Základní popis řídicího programu .....	64
4. Měření parametrů a testování olověných akumulátorů.....	65
4.1 Měření základních parametrů olověných akumulátorů.....	65
4.1.1 Samovybíjení akumulátorů .....	65
4.1.2 Měření vybíjecí charakteristiky a celkové kapacity akumulátoru .....	66
4.1.3 Měření vnitřního odporu akumulátoru .....	67
4.2 Testování nabíjecích a diagnostických metod .....	68
4.2.1 Obnovení akumulátoru po dlouhém odstavení z provozu .....	68

4.2.2 Měření dvoustavového nabíjecího cyklu .....	69
4.2.3 Měření třístavového nabíjecího cyklu .....	70
4.2.4 Testování diagnostických metod .....	71
5. Závěr .....	73
Seznam ilustrací.....	75
Seznam tabulek.....	77
Reference .....	78
Přílohy .....	80





# 1. Úvod

Elektronické systémy jsou v dnešní době běžnou součástí života lidí a jejich využití je zastoupeno v každém myslitelném oboru lidské činnosti. Nejedná se pouze o spotřební elektroniku, kterou jsme kompletně obklopeni, ale také o aplikace, kdy elektronické systémy chrání lidské životy. Pro tyto bezpečnostní systémy platí nejvyšší nároky na vývoj, jejichž cílem je bezchybná a bezpečná funkcionalita. Pro určitou skupinu těchto systémů je zásadním bezpečnostním požadavkem bezchybná funkce i po výpadku hlavního napájecího přívodu. Klasickým příkladem je systém železničního přejezdu, jehož selhání by mohlo vést ke střetu vozidla s vlakem a v nejhrošším případě ke ztrátě na lidských životech.

Bezpečnostní systém tedy musí obsahovat zálohovací subsystém s náhradním zdrojem elektrické energie. Existuje spousta technologií zálohování, které je možné použít. Například u zálohovacích systémů, kde je potřeba zálohovat subsystémy s velkým výkonovým odběrem, nebo po velmi dlouhou dobu, se nejčastěji používají spalovací agregáty. Mezi základní nevýhody těchto agregátů patří jejich výrazné rozměry, hlučnost, vysoká cena a především riziko exploze způsobené nutností použití nebezpečných výbušných látek, kterými jsou pohonné hmoty spalovacího agregátu. Významnou nevýhodou je také obtížná implementace řízení a optimalizace jejich chodu. Další často používanou metodou zálohování je využití solárních panelů. Jejich základními nevýhodami je nízký výstupní výkon a především závislost na slunečním záření, kvůli němuž není možné tento princip použít jako primární zdroj napájení, nýbrž jen jako sekundární pomocný zdroj. Pro systémy, kde není požadavkem velmi vysoký výstupní výkon ani dlouhý interval zálohování překračující jednotky dnů, se nejčastěji jako zdroje energie využívají sekundární galvanické články, tedy akumulátory.

Cílem této diplomové práce je rozbor návrhu bezpečnostního a bezúdržbového zálohovacího systému, použitelného v drážní aplikaci. Rozbor návrhu se musí nejprve zabývat samotnou koncepcí jednotlivých komponent v zálohovacím systému, s diskuzí nad podmínkami vhodného využití jednotlivých koncepcí. Jak je již obsaženo v zadání práce, cíleno je na návrh systému s olovenými akumulátory. Je tedy nutné posoudit, které typy olovených akumulátorů jsou pro bezpečnostní systémy použitelné a které se nehodí. Jedním z požadavků na zálohovací systém je jeho bezúdržbovost. Té je možné dosáhnout v případě, kdy je zálohovací systém sám schopen sledovat kondici akumulátorů a není tak nutná pravidelná kontrola servisního technika. S tímto požadavkem je spojena také dlouhodobost systému. Pokud je systém schopný udržovat akumulátory v nejvhodnějším pracovním režimu, dojde k prodloužení jejich celkové životnosti a tím také k prodloužení životnosti celého systému. Dalším cílem je tedy rozebrat možnosti nabíjení a diagnostikování akumulátorů v systému za provozu. Pro srovnání navržených metod s reálným systémem byly zvoleny vstupní požadavky na zálohovací systém, obsažené v tabulce 1.

Pro splnění části zadání, která obsahuje praktické ověření navržených nabíjecích a diagnostických metod, je nutné navrhnout a realizovat elektronický modul, díky němuž bude možné určit vlastnosti akumulátorů a dále bude také možné olovené akumulátory nabíjet. Elektronický modul bude obsahovat obvod s mikroprocesorem řady STM32F4, který bude použit pro kompletní ovládání funkčních bloků modulu.

Posledním cílem práce proto bude (i s využitím již realizovaného modulu a dalšího laboratorního vybavení) ověřit použitelnost navržených nabíjecích a diagnostických metod. Tyto metody je poté nutné porovnat a diskutovat jejich možnost využití v reálném zálohovacím systému.

<b>Vstupní parametr zálohovacího systému:</b>	<b>Hodnota:</b>
Zálohovací napětí	48 V
Průměrný proudový odběr	7,69 A
Průměrný odebíraný výkon	378, 72 W
Minimální doba zálohování	3 h
Typ zálohovacího média	Olověný akumulátor
Maximální doba nabití akumulátoru	20 h
Minimální požadavek diagnostiky	Stanovení konce životnosti akumulátoru
Požadavek na údržbu	Minimální nutnost zásahu obsluhy

**Tabulka 1 – První návrh parametrů zálohovacího systému**

## 2. Rozbor zadání

### 2.1 Zálohovací systémy elektronických zařízení

Pokud je v jakémkoliv systému vyžadováno použití olovených akumulátorů, je pro návrháře tohoto systému velice důležité, aby si uvědomil, v jakém režimu použití akumulátor bude využíván. U akumulátorů se režimy využití dělí do následujících dvou základních kategorií:

1. Cyklický režim
2. Zálohovací režim

Akumulátory pracují v **cyklickém režimu**, pokud jsou využívány jako výhradní zdroj napětí. Příkladem mohou být veškerá přenosná zařízení, jako například mobilní telefony, případně se jedná také o elektrická vozítka, jako například elektrické invalidní vozíky, nebo zdvihací vozíky. U těchto systémů se využívá akumulátor jako hlavní zdroj energie a obnova jeho kapacity nastává na konci jeho používání, případně při vybití akumulátoru na minimální bezpečné napětí. V cílovém zálohovacím systému pro tuto diplomovou práci jsou olovené akumulátory využívány jako zálohovací prvek, tedy pracují v zálohovacím režimu. Tato kapitola se tedy dále zabývá pouze koncepcemi systémů, ve kterých je samostatný hlavní primární zdroj a akumulátory jako zdroj záložní, tedy sekundární. Příkladem takových koncepcí jsou systémy UPS, zálohy zabezpečovacích zařízení, atd.

#### 2.1.1 Zálohovací koncepty elektronických systémů

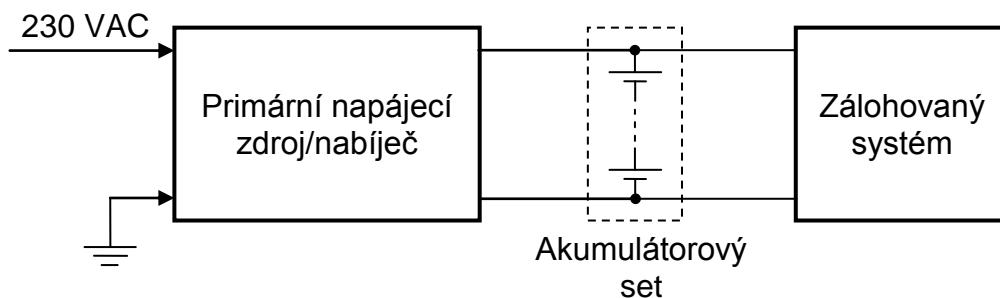
Při návrhu zálohovacích systémů s olovenými akumulátory je jedním z nejdůležitějších kroků výběr samotné koncepce systému. Jako koncepci systému bereme rozložení zálohovacího média, primárního napájecího zdroje a zálohovaný obvod, tedy zátěž. Z tohoto pohledu můžeme základní koncepci rozdělit do tří skupin:

1. Sériová
2. Paralelní (Přepínací)
3. Kombinovaná

Výběr mezi těmito koncepcemi je závislý od vstupních požadavků na celkový systém, tedy na prioritách, které jsou nejdůležitější. Příkladem může být upřednostnění životnosti baterie před rychlostí sepnutí sekundárního zálohovacího zdroje. Dalším kritériem pro vhodný výběr koncepce může být samotné fyzické (konstrukční) rozložení systému. Například jinou koncepcí budeme volit u systémů, kde je požadavkem co nejmenší prostorová náročnost, tedy je nutné použít co nejméně komponent, na rozdíl od systémů, kde je prostoru dostatek a není problém s rozměry jednotlivých komponent. S tímto jsou také úzce spojeny požadavky na bezpečnost systému. Pokud má mít systém vysoký stupeň zabezpečení, tedy pokud je prioritní, aby byl kdykoliv systém v provozu, musí být použito mnohem více komponent, než u systémů, kde je chyba zálohovacího systému přípustná. Příkladem můžeme zmínit rozdíl mezi zálohováním spotřební elektroniky a zálohováním lékařských přístrojů, případně železničních zabezpečovacích systémů.

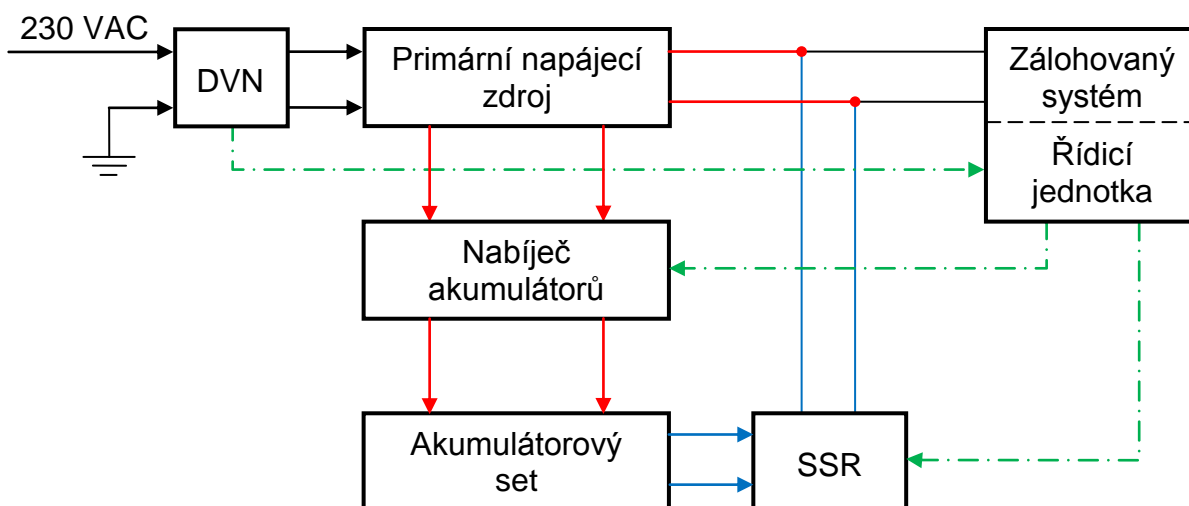
Prvním typem zálohovacího konceptu s olovenými akumulátory je **sériová topologie**, viz obr. 1. Tato koncepce je výhodná především díky své jednoduchosti. Odpadá zde potřeba implementace přepínače mezi primárním a sekundárním zdrojem. S tím také odpadá

implementace logiky, která bezpečně ovládá přepínač. Nevýhodou této koncepce je větší namáhání akumulátoru. Jak lze sledovat na obr. 1, akumulátor je namáhán v celém průběhu činnosti koncového zařízení. Dochází tak tedy k vyššímu opotřebení akumulátoru a tím ke zkrácení celkové životnosti. Dále má tato koncepce omezené možnosti nabíjení, neboť nabíjecí napětí je přímo úměrné napětí na výstupu systému. To může být komplikace především v případě, kdy musí být vstupní napětí koncového zařízení udržováno v daném úzkém rozsahu napětí, s čímž je také spojen problém s nabíjením konstantním proudem. Zásadní výhodou této koncepce je však rychlost připojení záložního zdroje. K připojení dojde prakticky okamžitě ve chvíli, kdy klesne napětí primárního zdroje pod úroveň napětí olověných akumulátorů.



Obr. 1 – Principiální zapojení sériové topologie zálohovacího systému

Druhým zálohovacím konceptem s olověnými akumulátory je **paralelní (přepínací) topologie**, viz obr. 2. Tato koncepce je oproti předchozí sériové složitější na implementaci. Jak je patrné z obr. 2, systém musí být implementován mnohem více funkčními bloky. Prvním takovým funkčním blokem je samostatný nabíječ akumulátorů. Jeho funkcí je udržovat akumulátory trvale nabitě. Případně po zálohovacím cyklu přivést akumulátory co nejdříve do nabitého stavu. Při takovém nabíjení je z primárního zdroje odebrán vysoký výkon a zvyšuje se tak požadavek na primární zdroj ohledně maximálního výkonu. V systémech se většinou používá samostatný primární zdroj s nabíječem. Tyto dva funkční bloky se však mohou také implementovat do jednoho zařízení. V obou případech je však tato koncepce oproti sériové prostorově náročnější.



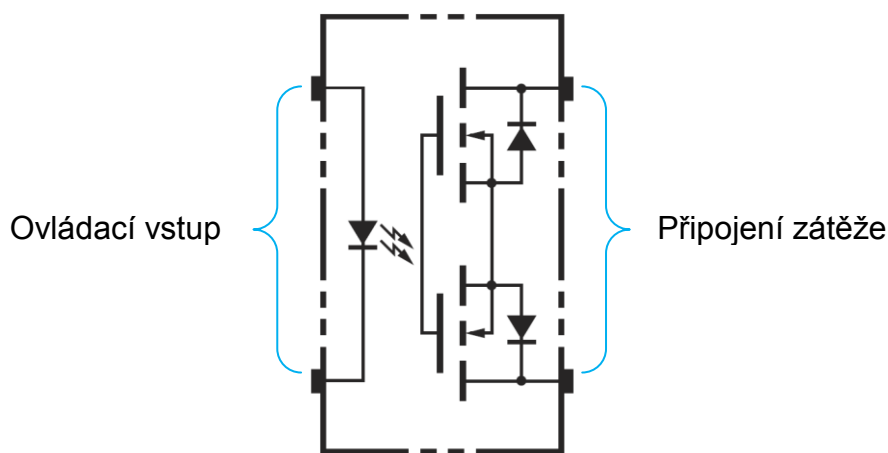
Obr. 2 – Principiální zapojení sériové topologie zálohovacího systému (DVN – Detektor Výpadku Napájení, **červená** – běžný režim, **modrá** – zálohovací režim, černá – nezávislé části, **zelená** – řídicí signály)

Dalším funkčním blokem v paralelní topologii je přepínač. Jeho funkcí je v případě výpadku, nebo poruchy primárního zdroje, přepnout na napájení ze záložního zdroje, tedy napájení olovenými akumulátory. Ačkoliv se může tento blok jevit velice jednoduše, opak je pravdou. Přepínací prvek v paralelní koncepci je jednou z nejkritičtějších a nejnamáhanějších částí. Jakákoliv jeho porucha může způsobit chybu zálohovaného systému. Nemusí se však okamžitě jednat o fatální poruchu, nýbrž pouze o změnu vlastností v pracovním cyklu systému. Konkrétně se může jednat o dobu přepnutí. Pokud dojde k pomalejšímu přepnutí z primárního na sekundární zdroj, může dojít k významnému poklesu vstupního napětí na zálohovaném systému a tím k jeho restartu. Nejčastěji se jako přepínače (spínače) používají polovodičová relé, tzv. **SSR (Solid State Relay)**. Tato zařízení jsou funkcí shodná s funkcí klasických elektromechanických relé, avšak spínacím prvkem je zde polovodičový prvek, kterým může být například optotriak, případně Mosfet tranzistor. Galvanické oddělení je u SSR řešeno pomocí optické vazby na principu klasických optočlenů. [26]

Hlavní výhodou SSR je rychlost sepnutí a rozepnutí, nižší elektromagnetické rušení okolí, nízký spínací proud a především díky absenci pohyblivých částí vyšší životnost, než u elektromechanických relé. Největší nevýhodou SSR je jejich napěťový úbytek daný jejich polovodičovou strukturou. Například SSR relé, kde je spínacím prvkem optotriak, může mít úbytek napětí při sepnutém stavu  $U_{on\_SSR} = 1,15 \text{ V}$ . [27] Tento úbytek způsobuje výkonové ztráty SSR, které pro výše zmíněné SSR mohou být při spínaném proudu  $I_{load} = 10 \text{ A}$  rovny

$$P_{SSR} = U_{on\_SSR} * I_{load} = 1,15 * 10 = 11,5 \text{ W} \quad (2.1.1/1)$$

Takto velký ztrátový výkon je nutné pasivně chladit, aby nedošlo vlivem vysoké teploty k poškození samotného SSR. Je tedy nutné použít dostatečně dimenzovaný chladič a tím se zároveň zvyšují prostorové a konstrukční požadavky na systém. Tento problém se ztrátovým výkonem může být do určité míry potlačen pomocí Mosfet tranzistorů, které jsou především použitelné pro spínání stejnosměrných proudů. Nezanedbatelnou nevýhodou SSR oproti klasickým elektromechanickým relé je pak jejich výrazně vyšší cena. Na obr. 3 je znázorněno vnitřní principiální zapojení SSR s antisériovým zapojením dvou Mosfet tranzistorů. [26]



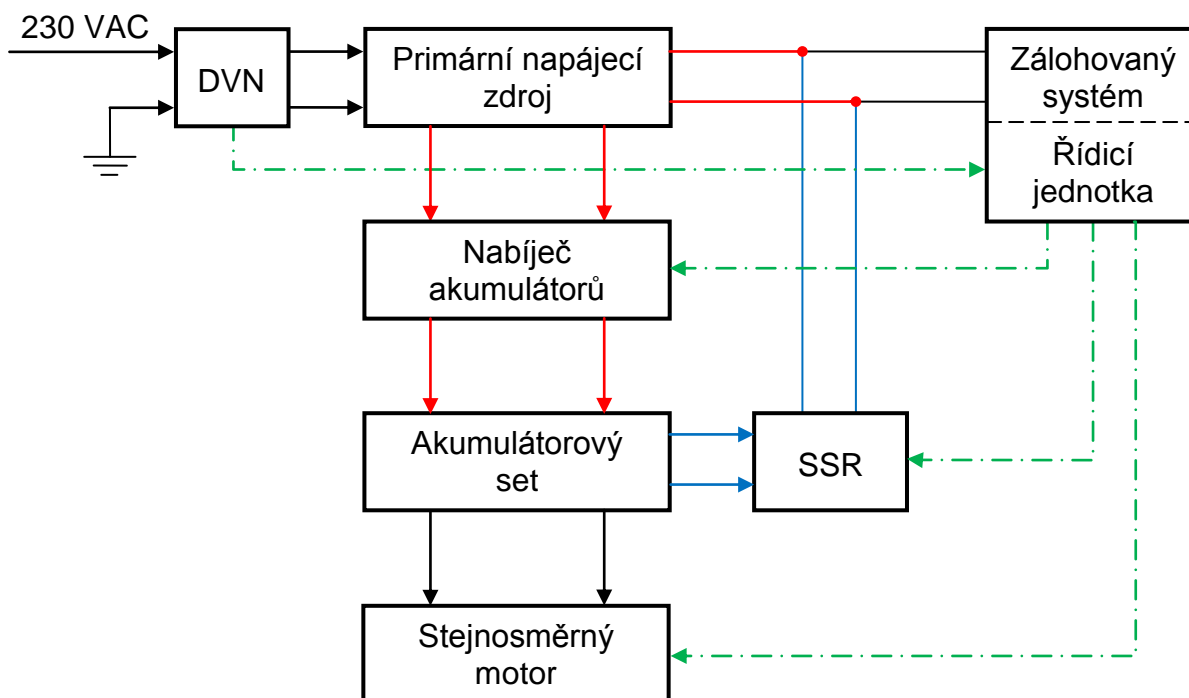
**Obr. 3 – Principiální vnitřní zapojení SSR s Mosfet tranzistory [29]**

U paralelní (přepínací) koncepce je zásadní výhoda ve využití akumulátorů, které se připojují k zálohovanému obvodu až ve chvíli, kdy je potřeba použít záložní zdroj. Akumulátory jsou tak většinu svého pracovního času mimo jakékoliv zatížení a mohou se nabíjet libovolnými

nabíjecími metodami. Díky tomu je možné oloveným akumulátorům vytvořit téměř ideální pracovní podmínky pro dosažení jejich co nejdelší životnosti.

Poslední zmíněnou koncepcí je **kombinace sériové a paralelní topologie**. Příkladem může být zapojení zobrazené na obr. 4. Základní koncepce je založena na paralelní topologii. V případě, kdy je v systému nutné použít komponentu, která má vyšší proudový odběr, než je schopný dodat primární zdroj, můžeme využít přímo olovené akumulátory. Jak je popsáno v následujících kapitolách, olovené akumulátory jsou velmi tvrdé napěťové zdroje, tedy jsou schopny dodat velmi vysoké proudy s nízkým poklesem napětí na výstupu. Jak lze vidět na obr. 4, jedna z takových komponent může být například stejnosměrný motor. Pokud je navíc na hřídel motoru permanentně připojena zátěž, dochází při změně pohybu motoru k velkému špičkovému odběru proudu. Takto velký špičkový odběr proudu pak může způsobit velký pokles napětí na výstupu primárního zdroje a zálohovaný systém může pracovat chybně, případně může dojít k jeho dočasnému vypnutí. Taková situace nesmí u bezpečnostních systémů nikdy nastat, a proto se často přistupuje k této koncepci.

Nevýhodou použití této koncepce je složitější implementace a především složitější instalace systému, neboť je nutné montovat kabeláž na více komponent zvlášť a ne pouze na vstupní svorky zálohovaného systému, jako u předchozích koncepcí. Dále, oproti paralelní koncepci, dochází k zatěžování akumulátorů i mimo zálohovací cyklus. Baterie tedy nedosahují stejné úrovně životnosti. Výhodou je však úspora financí a fyzického prostoru, protože není nutné pořizovat silnější primární zdroj, který by pokryl špičkové odběry induktivních zátěží, jako např. stejnosměrných motorů.



**Obr. 4 – Principiální zapojení kombinované topologie zálohovacího systému (DVN – Detektor Výpadku Napájení, červená – běžný režim, modrá – zálohovací režim, černá – nezávislé části, zelená – řídicí signály)**

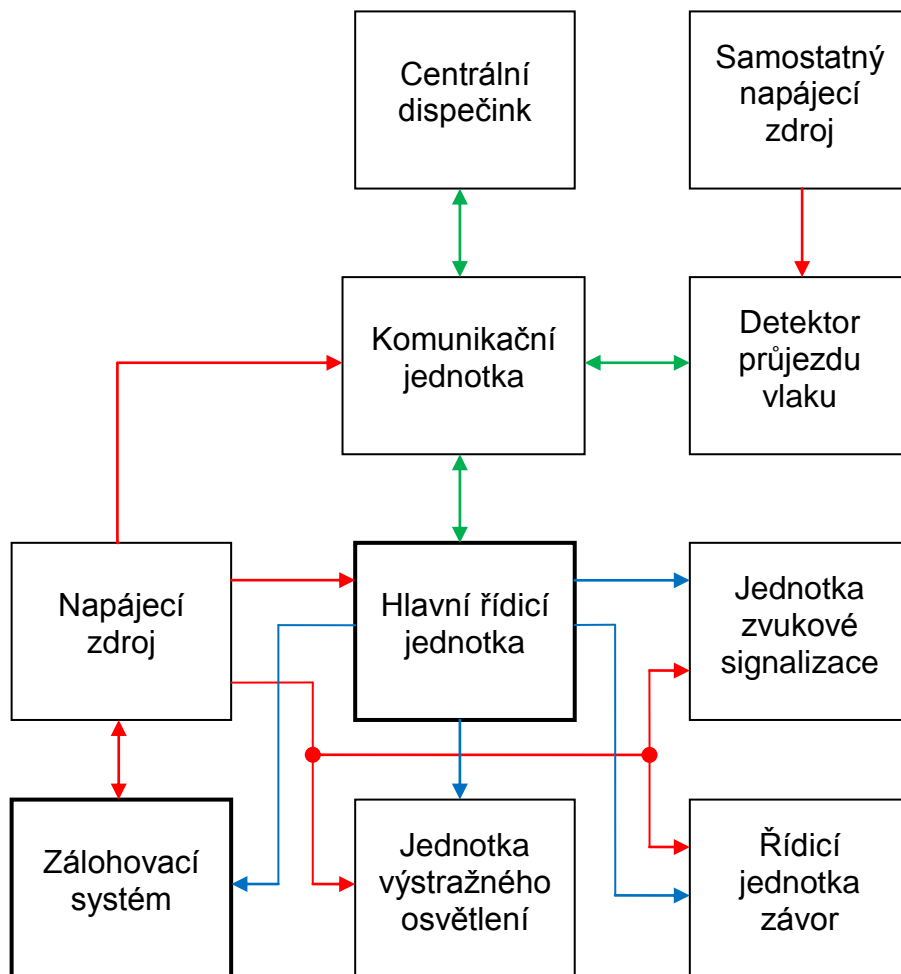
## 2.1.2 Specifikace zálohování drážních bezpečnostních systémů

Předchozí kapitola se zabývala obecným postupem při výběru zálohovací koncepce pro libovolné typy systémů. Jak je již obsaženo v zadání této práce, cílový systém, pro který se v této práci navrhuje potřebné metody nabíjení a diagnostiky, je drážní zabezpečovací systém. Tento typ systémů má svá daná specifika a je proto potřebné se jimi řídit, aby byly splněny veškeré požadavky. Drážní zabezpečovací systémy, ať se již jedná o řízení provozu vlaků, systémy automatického brzdění vlaků, či řízení provozu železničních přejezdů, jsou obklopeny nespočtem drážních norem, které se musí bezpodmínečně dodržovat. Nároky na tyto systémy jsou velmi vysoké. Důvodem je především ochrana lidských životů, neboť při sebemenší poruše jediného zabezpečovacího systému může dojít ke katastrofě. Příkladem může být situace, kdy na železničním přejezdu bez závor nesvítí výstražné světlo. Automaticky se tak železniční přejezd stává vysoce nebezpečným a může dojít k vážné nehodě.

Cílový systém, kterého se týká tato diplomová práce, je železniční přejezd. Železniční přejezdy jsou komplexní systémy, které se skládají z několika podsystémů, tedy z několika jednotlivých bloků. Každý blok systému má daný stupeň zabezpečení, který se liší v závislosti na úrovni nebezpečí, které způsobí jeho chyba. Příkladem může být rozdíl mezi důležitostí výstražného osvětlení a zvukové signalizace na přejezdu bez závor. Pokud selže zvuková signalizace, nejedná se o fatální chybu celkového systému, neboť se předpokládá, že řidič splňuje zdravotní podmínky pro řízení vozu, tedy není především nevidomý. Pokud by ale selhalo výstražné osvětlení, jedná se o zásadní chybu, neboť například přes běžící motor nemusí být slyšet zvuková signalizace, ale světelná signalizace musí být vždy viditelná. V tomto případě má jednotka zvukové signalizace nízkou úroveň zabezpečení, zatím co jednotka výstražného osvětlení má úroveň zabezpečení nejvyšší. Příkladem vysoké úrovně zabezpečení u výstražného osvětlení je použití dvou vláken v žárovkách. Zjednodušené blokové schéma železničního přejezdu je znázorněno na obr. 5.

Tato diplomová práce se zabývá požadavky na zálohovací systém, který je také nutné navrhovat pomocí daných drážních předpisů. Základním požadavkem pro zálohovací systém drážního bezpečnostního systému je minimální doba funkčnosti systému v zálohovacím režimu. Tedy minimální čas, po který musí konkrétně olověné akumulátory, zálohovat celý systém. Jak je již zavedeno v kapitole 1, tato minimální doba je drážními předpisy stanovena na 3 hodiny. Po této době přechází železniční přejezd do speciálního offline režimu.

Drážní předpisy dále určují, jakým způsobem vypadá chybový stav systému. Tedy které systémy musí bezpodmínečně fungovat. Pro každý podsystém existují také minimální požadavky. Například u výstražného osvětlení musí svítit světlo minimálně ve směru jízdy řidiče. Světlo mířící do protisměru není tak důležité. Stejná situace je také u závor, kdy je podstatná funkce především ve směru řidiče. Součástí požadavků na drážní systémy jsou taktéž rozmezí pracovních teplot. Přirozeně jsou veškeré komponenty vystaveny celoročním změnám klimatu, a proto se musí dostatečně dimenzovat každý prvek v systému. Běžně se udává rozmezí teplot od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tento parametr je z hlediska zálohovacího systému velice důležitý, protože okolní teplota velice významně mění životnost a celkovou kapacitu olověných akumulátorů. Nejsou proto výjimkou klimatizované, případně pouze vyhřívané prostory pro zálohovací akumulátory, které jsou běžně vidět poblíž převážné většiny železničních přejezdů.



Obr. 5 – Principiální blokové schéma elektroniky železničního přejezdu (**červená** – napájecí linka, **modrá** – řídicí signály, **zelená** – komunikační signály)

## 2.2 Popis olověných akumulátorů a kritérií pro jejich výběr

### 2.2.1 Typy olověných akumulátorů a jejich vhodný výběr

Akumulátory jsou elektronická (elektrochemická) zařízení, která spadají do kategorie galvanických článků, avšak oproti ostatním typům (primární články) jsou schopny energii nejen vydávat, ale také akumulovat (sekundární články). Jsou tedy vícekrát použitelné, s omezením v podobě jejich celkové životnosti. Akumulátorové baterie (dále již jen akumulátory) jsou skládány z jednotlivých článků (monočlánků) a jejich počet udává jejich nominální výstupní napětí.[1]

Po celém světě se v průmyslu velice často používají **olověné akumulátory**. Tradice jejich využívání sahá do roku 1859, kdy byl vytvořen první olověný akumulátor Gastonem Plantem (1834 - 1889). Základní prvky, používané pro výrobu tohoto typu akumulátoru, jsou téměř totožné od prvního vytvořeného prototypu. Jedná se tedy o článek, ve kterém jsou použity olověné (Pb) elektrody a elektrolyt je tvořen kyselinou sírovou ( $H_2SO_4$ ). Dnešní olověné akumulátory jsou samozřejmě mnohem sofistikovanější. Jejich konstrukce a použité materiály jsou na mnohem vyšší úrovni, avšak základem jsou vždy oba výše zmíněné prvky.[1]



Historie této technologie není nevýhodou, nýbrž naopak. Za dlouhé roky vývoje a využívání v elektronických zařízeních se z olovených akumulátorů stala prověřená technologie. Toho se využívá především v systémech, kde je kladen důraz na bezchybnost provozu, případně kde se dají předvídat veškeré možné poruchy. Takovým systémem jsou například železniční přejezdy, kde je důležité, aby zálohovací médium neselhalo nějakým nepředvídatelným způsobem. Proto se také využívají v železničním přejezdu, který je cílovým pro tuto diplomovou práci. Mezi základní výhody olovených akumulátorů patří velice nízký vnitřní odpor v řádech miliohmů, díky kterému je akumulátor schopen dodat do systému velice vysoké proudy při minimálním poklesu terminálového napětí (vyžití v automobilovém průmyslu).

Dále jsou oproti ostatním typům akumulátorů velice odolné proti vnějším vlivům. Tento aspekt se využívá například v automobilovém průmyslu, protože je akumulátor nejčastěji umístěn v prostoru motoru, kde jsou převážnou většinu času extrémní podmínky. Nakonec se také jedná o účinnost akumulátoru, která se pohybuje průměrně kolem hodnoty  $\mu_{acu} = 85\%$ . Tento parametr označuje poměr mezi energií, kterou je schopen dodat do systému, a energií, kterou spotřebuje při nabíjení. Olovené akumulátory mají samozřejmě také své nevýhody. Jednou z nich je jejich hmotnost, která se sice zvýšením efektivity díky vývoji výrobních technologií snížila, ale stále je značná. Například akumulátor s kapacitou 33 Ah má hmotnost 12 kg.[1] Olovené akumulátory se dělí na dvě základní kategorie:

1. Akumulátory s nutnou údržbou (angl. **maintenance**)
2. Akumulátory bez nutné údržby (angl. **maintenance free**)

**Akumulátory s nutnou údržbou** jsou nejstarším typem akumulátorů. Vyznačují se servisními otvory z vrchní strany pouzdra akumulátoru, které slouží pro dolévání destilované vody a zároveň pro měření hustoty elektrolytu. Elektrody jsou ponořené do tekutého elektrolytu, a proto se také často nazývají akumulátory se zaplavenými elektrodami. Elektrolyt se může odpařovat samovolně, nebo také při nabíjení na úroveň plynovacího napětí. Především se však hladina elektrolytu zmenšuje elektrolýzou, která probíhá při běžné činnosti akumulátoru. Hladina elektrolytu se poté dolévá servisními otvory destilovanou vodou. Tím se vrátí akumulátoru původní hodnota nominální kapacity. Kapacita akumulátoru se poté měří pomocí hustoměru, kde při teplotě 25 °C je hustota elektrolytu rovna přibližně 1,28 g/cm<sup>3</sup> [21]. Hustota elektrolytu je závislá na teplotě, a proto je nutné také korigovat měření hodnoty kapacity. Se změnou hustoty elektrolytu v závislosti na teplotě je také spojen jev olovených akumulátorů, kdy se s teplotou mění celková kapacita. Při nízké teplotě má elektrolyt vyšší hustotu, a tím nižší kapacitu. Nižší hustota při vyšších teplotách poté odpovídá vyšší kapacitě. Příklad údržbového akumulátoru je znázorněn na obr. 6. [1], [2], [15]

**Bezúdržbové akumulátory** mají oproti údržbovým zásadní výhodu – není nutné kontrolovat jejich stav elektrolytu, ani ho nijak doplňovat. Pojem bezúdržbový akumulátor se však velice často nepřesně interpretuje. Pojem bezúdržbový akumulátor neznámá, že se o něj nemusíme od zakoupení vůbec starat. Tento pojem je čistě spojen pouze s vynecháním potřeby dolévat ručně elektrolyt a kontrolovat jeho hustotu. Akumulátor se však i nadále musí nabíjet v závislosti na okolní teplotě. Podle ní ho také skladovat a hlídat mezní provozní hodnoty, jako maximální nabíjecí proud, maximální nabíjecí napětí a minimální napětí na akumulátoru při vybíjení. Všechny tyto požadavky jsou pro oba dva typy akumulátorů totožné.



**Obr. 6 – Klasický (údržbový) olovený akumulátor Victron OPzS Solar 910 [15]**

Bezúdržbové akumulátory jsou dnes nejvíce využívány. Jejich rozměry jsou nižší a vystačí pro většinu elektronických aplikací, kde není nutné zajistit co nejdelší životnost akumulátoru. Z hlediska konstrukce zařízení je možné instalovat bezúdržbové akumulátory do malých prostor, neboť není nutná pravidelná kontrola servisními technikami. Zároveň mají bezúdržbové akumulátory výhodu ve výrazně nižším úniku výparů při provozu. Není tak nutná ventilace prostoru baterií.[17]

Nižší koncentrace výparů při provozu bezúdržbových akumulátorů je dána jejich konstrukcí. Tato konstrukce se anglicky nazývá **SLA (Sealed Lead Acid)**, tedy zapouzdřené olovené akumulátory. Takový typ akumulátoru je umístěn do pouzdra, který má pouze vyvedené elektrody s nejkvalitnějším a nejzápornějším potenciálem. Tyto akumulátory mají malé rozměry a jejich nominální kapacita se pohybuje do 10 Ah. Jejich nevýhodou je možnost tzv. nafouknutí, kdy při nedbalém provozu může docházet k přílišnému plynování baterie a tím k velkému nárůstu tlaku uvnitř pouzdra akumulátoru. Tento jev může způsobit až explozi akumulátoru. Tyto akumulátory jsou jedny z nejlevnějších, které se dají pořídit, a proto jsou také velice často používány. Příklad nového a nafouknutého SLA akumulátoru je znázorněn na obr. 7. [17]

Aby bylo možné bezpečně používat bezúdržbové akumulátory s vyšší nominální kapacitou než 10 Ah, byl vytvořen upravený typ SLA akumulátoru, tzv. **typ VRLA (Valve Regulated Lead Acid)**, tedy ventilem regulované olovené akumulátory. Tato konstrukce se liší od typu SLA pouze zavedením jednosměrného bezpečnostního ventilu pro odvod výparů z elektrolytu. Funkce regulačního ventilu je taková, že v případě, kdy se například při nabíjení na plynovací úroveň uvolňují výpary, vzroste v pouzdra akumulátoru tlak. Ve chvíli, kdy překoná mezní hodnotu pro otevření ventilu, dojde k jeho uvolnění přes ventil ven z pouzdra. U této konstrukce tedy v průběhu používání dochází k uvolňování výparů, avšak není to v takovém objemu, jako u údržbových akumulátorů.

Tyto akumulátory jsou tedy zároveň vhodné do aplikací, kde jsou náročnější okolní podmínky a zároveň je nutné, aby akumulátor neohrozil ostatní zařízení v konstrukci, v níž je umístěn. Příklad VRLA akumulátoru je znázorněn na obr. 8. Regulační ventil umístěn uprostřed vrchní strany. [1]



**Obr. 7 – Ukázka nového a poškozeného SLA akumulátoru [18], [19]**

▪ Jak již vyplývá z předchozího popisu bezúdržbových akumulátorů a z kapitoly 2.1.1, pro cílový drážní systém byly zvoleny **bezúdržbové VRLA akumulátory**. Bylo tak zvoleno především kvůli umístění akumulátorů v prostoru, kde k nim není možné jednoduše přistupovat a provádět tak jejich základní údržbu, například dolévání destilované vody do elektrolytu. Zároveň budou umístěny v prostoru, kde by jejich pouhé nafouknutí mohlo znamenat narušení celkové funkce systému. Mohlo by se tak stát v důsledku mechanického odlomení komponenty z DIN lišty, neboť komponenty jsou v konstrukci umístěny blízko u sebe.



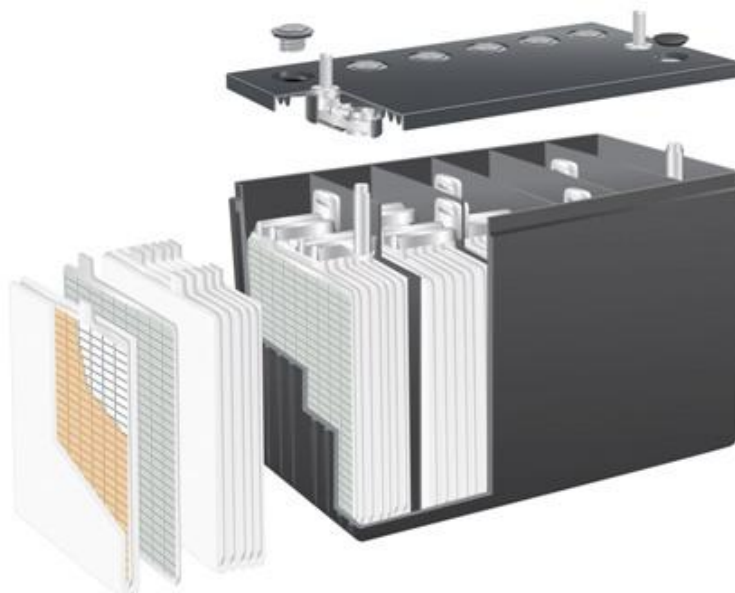
**Obr. 7 – Ukázka VRLA akumulátoru FIAMM 12FGL33 [20]**

Bezúdržbové akumulátory se dále dělí podle technologie elektrolytu a separátoru. Tento parametr olovených akumulátorů má v dnešní době největší potenciál pro inovace a nová vylepšení. Mezi aktuální typy koncepce elektrolytu patří následující technologie:

1. **AGM** (Absorbed Glass mat)
2. **GEL**
3. **Lead Crystal**<sup>®</sup>

Nejrozšířenějšími typy olovených VRLA akumulátorů jsou v dnešní době první dva výše zmíněné, tedy AGM a GEL. Jejich rozdíly jsou v dnešní době téměř minimální. Neexistují žádné oficiální nezávislé srovnávací testy těchto dvou technologií. Většina výrobců se specializuje pouze na jednu technologii a tu pak následně prosazuje jako tu lepší. Některé rozdíly však mezi nimi existují.

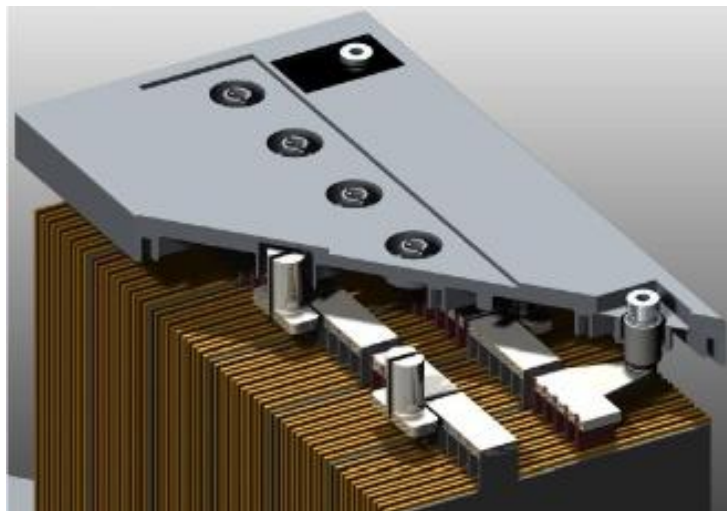
Prvním rozdílem je samotná použitá technologie elektrolytu a separátoru. **AGM akumulátory**, jak již vyplývá z názvu, mají separátor řešený pomocí speciálních skelných vláken, obr. 8. **Separátor** je důležitá součást všech akumulátorů. Je to izolant, který zabraňuje zkratům mezi kladnými a zápornými elektrodami uvnitř akumulátoru. Zároveň však musí umožnit iontovou vodivost, aby byla umožněna funkce akumulátoru.[22] Typ separátoru se skelnými vlákny je významný právě svou výbornou iontovou vodivostí a zároveň dobře propouští plyny, což je důležité pro rekombinaci mezi elektrodami a elektrolytem. **AGM akumulátorům** se také říká **akumulátory s vázaným elektrolytem**. Tento název se týká právě použitému typu separátoru. Díky jeho vynikajícím vlastnostem je možné elektrolyt navázat, neboli vsáknout přímo do separátoru (skelných vláken). Proto tento typ akumulátoru nemá žádný tekutý elektrolyt a jeho vnitřní struktura se může jevit jako suchá. Díky tomuto jsou AGM akumulátory používány hojně v letectví, např. ve stíhacích letounech, kdy může dojít k naklonění akumulátoru na jakoukoliv stranu.[1]



**Obr. 8 – Vnitřní struktura AGM akumulátoru [22]**

Na rozdíl od AGM akumulátorů mají **gelové akumulátory** běžný typ separátoru, stejný jako u údržbových akumulátorů. Jedná se například o porézní membrány z polymerických

materiálů. Základní rozdíl oproti AGM akumulátorů je v elektrolytu. Jak již vyplývá z názvu, elektrolyt je součástí křemičitého gelu, který je aditován dalšími potřebnými látkami pro korektní funkci. Gelové akumulátory tedy mají konstrukci téměř shodnou jako údržbové akumulátory, avšak elektrolyt nemají tekutý, nýbrž v podobě gelu, obr. 9. Elektrolyt proto při naklonění akumulátoru nemůže vytéct a díky tomu se také často využívají v letadlech.[1]



**Obr. 9 – Vnitřní struktura gelového akumulátoru [23]**

AGM a gelové akumulátory mají hlavní rozdíl ve svojí vnitřní konstrukci elektrolytu a separátoru. Mezi těmito dvěma akumulátory jsou i funkční rozdíly, které se týkají především provozních parametrů. Hlavní výhodou AGM akumulátorů je jejich nízký pokles celkové kapacity při nízkých teplotách, tedy akumulátor je schopný dodat vysoký výkon. Gelový akumulátor je zase vysoce odolný proti poškození hlubokým vybitím.[16]

Třetím typem VRLA regulátoru, který je v dnešní době k dostání, je typ **Lead Crystal<sup>®</sup>**, viz obr. 10. Tato technologie je zatím velice mladá, a proto není téměř vůbec prověřená v provozu, případně neexistují žádné veřejné nezávislé testy veškerých parametrů. Dle informací od výrobce, je tento typ akumulátorů strukturou velice podobný technologii AGM. Elektrody jsou nasycené vápníkem a selenem pro zvýšení celkové životnosti. Elektrolyt je založený na bázi  $\text{SiO}_2$  a jeho specifikací je tuhnutí při nabíjení, nebo vybití. Největší výhodou tohoto typu akumulátorů je jeho extrémní odolnost vůči vysokým teplotám, které nejvyšší mírou ovlivňují životnost akumulátorů, viz další kapitola 2.3.2.[24]

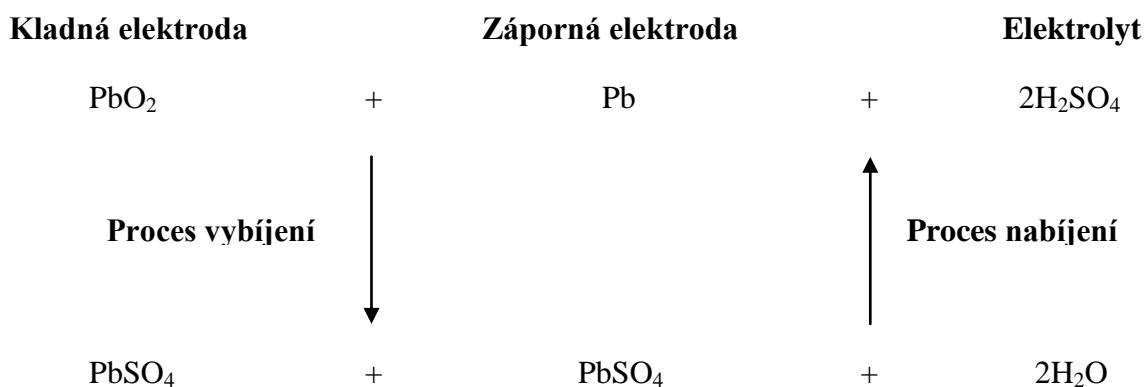
▪ Pro cílový drážní systém, který je zmiňovaný v kapitole 1, bylo taktéž nutné zvolit typ VRLA akumulátoru. V souvislosti se vstupními požadavky na systém byl zvolen typ AGM. S gelovými akumulátory mají téměř shodné vlastnosti, avšak každá technologie má svojí hlavní výhodu. Gelový akumulátor je odolnější vůči hlubokému vybití. Tato výhoda je výhodná především v systémech, kde jsou baterie hlavním zdrojem energie, a kde dochází velice často k úplnému vybití. Takovým však cílový drážní systém není. Mnohem lépe využitelná je výhoda AGM akumulátorů, které mají při nízkých teplotách oproti ostatním technologiím vyšší celkovou kapacitu. Například v zimních měsících může klesat teplota baterií pod  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , avšak požadavky na dobu zálohování zůstávají stejné. Nemusí se proto ve velké míře předimenzovat celková kapacita akumulátoru, aby vystačila i při nízkých teplotách. Akumulátory s vyšší kapacitou jsou navíc rozměrnější, těžší a jsou obtížněji nabíjené. Celkové porovnání jednotlivých technologií VRLA akumulátorů je shrnuto v příloze 3.



Obr. 10 – Akumulátor s technologií Lead Crystal® 6-CNJF-22 [25]

### 2.2.2 Základní parametry olověných akumulátorů

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, olověné akumulátory jsou elektrochemická zařízení, která spadají do kategorie sekundárních galvanických článků. Tato kategorie zahrnuje zařízení, která jsou schopna dodat elektrickou energii, ale na rozdíl od primárních článků jsou také schopná znovu přijmout elektrický náboj a ten si udržet do dalšího vybíjecího cyklu. Základním prvkem použitým pro konstrukci elektrod olověných akumulátorů je olovo Pb, elektrolyt je tvořen kyselinou sírovou  $H_2SO_4$ . Mezi těmito dvěma základními prvky v akumulátorech dochází při vybíjení a nabíjení k chemickým procesům, při kterých je do akumulátoru buď dodáván, nebo odebírán elektrický náboj. Chemické reakce v olověných akumulátorech jsou následující[21]:



Při procesu nabíjení dochází k houstnutí elektrolytu a při vybíjení naopak. Stav nabití akumulátoru je tedy možné zjistit pomocí hustoty elektrolytu. Při nabíjení zároveň dochází k tzv. plynování akumulátoru. Při kompletním rozkladu síranu olova dochází k elektrolýze vody a je tak uvolňována směs plynů kyslíku a vodíku. Toto se týká všech typů akumulátorů a dochází tak k celkovému úbytku kapacity v akumulátoru, neboť nedojde ke kompletní zpětné chemické reakci při nabíjení. U údržbových akumulátorů je tento problém řešen pomocí servisních otvorů pro dolévání destilované vody. U VRLA akumulátorů je použit jednosměrný ventil pro odvod výparů z akumulátorů, aby nedošlo k jejich mechanickému poškození, jako je to možné u hermetických akumulátorů SLA, viz kapitola 2.2.1.[16]

Olověné akumulátory jsou charakterizovány několika parametry, které mají svá specifika a při návrhu systémů s olověnými akumulátory je nutné se těmito parametry zabývat. Jedná se o následující parametry:

- Plynování
- Nominální kapacita
- Životnost
- Vnitřní odpor
- Nabíjecí parametry
- Vybíjecí parametry

Prvním důležitým parametrem u olověných akumulátorů je jejich úroveň **plynování**. Tento parametr je udáván jako objem výparů za jeden měsíc na jeden článek v akumulátoru při různých typech nabíjení pro kapacitu 1 Ah. Pro příklad můžeme uvést příklad z inženýrského návodu pro akumulátory AGM firmy Fiamm. Zde je uvedena hodnota plynování akumulátorů  $V_{gass\_float}$  při udržovacím nabíjení a při cyklovacím režimu  $V_{gass\_cycle}$  jako:[2]

$$V_{gass\_float} = 2 \text{ ml/Ah/článek/měsíc} \quad (2.2.2/1)$$

$$V_{gass\_cycle} = 10 \text{ ml/Ah/článek/měsíc} \quad (2.2.2/2)$$

Je tedy patrné, že při cyklovacím režimu dochází k 5x většímu plynování, než při udržovacím režimu. Z tohoto důvodu je pro získání co nejdelší životnosti akumulátorů výhodné udržovat akumulátory pomocí udržovacího napětí  $U_{float}$ , neboť nedochází k rychlé ztrátě elektrolytu a tím k úbytku celkové kapacity akumulátorů.

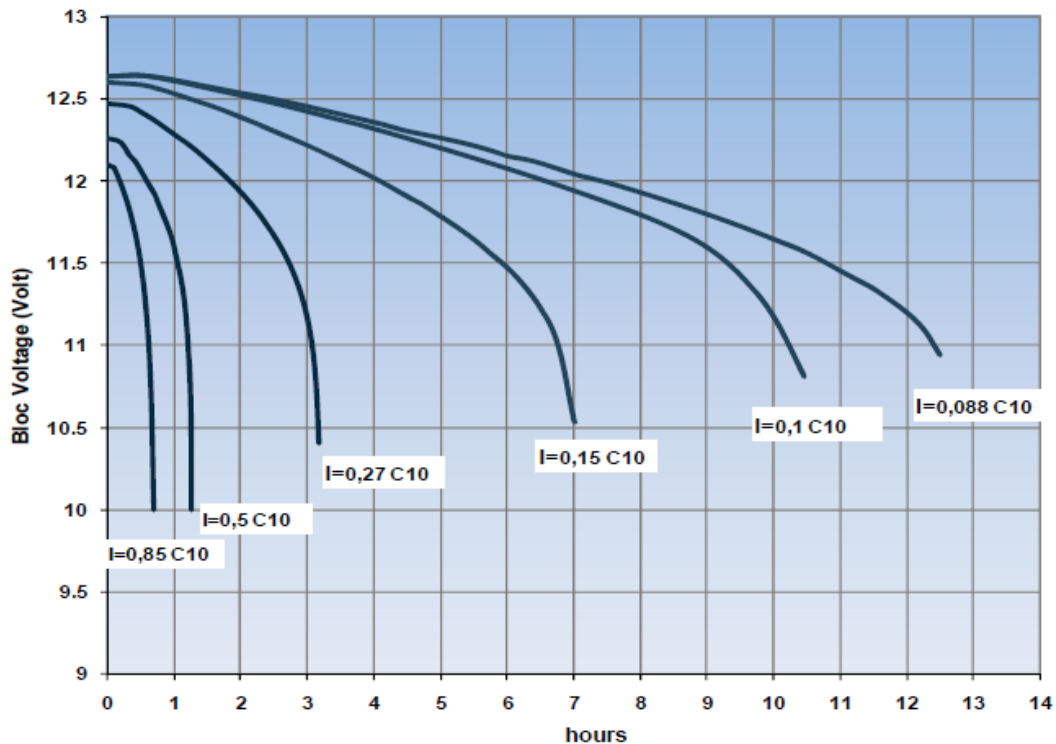
Základním parametrem, kterým je charakterizován každý olověný akumulátor, je jeho **nominální kapacita**. Nominální kapacita je označována jako  $C_{10}$ , případně  $C_{20}$ , a je udávána v jednotkách Ah. Tedy nominální kapacita akumulátoru značí, jak velký proud je akumulátor schopný dodat po danou dobu. Označení kapacity pomocí  $C_{10}$ , případně  $C_{20}$  je dáno normou EN60896-21/22[16]. V této normě je popsáno, jakým způsobem se má měřit kapacita akumulátoru a číslo 10, případně 20, označuje délku testu, tedy 10, případně 20 hodin. Test na měření kapacity se nazývá vybíjecí a ve zjednodušeném pohledu se jedná o vybíjení akumulátoru konstantním proudem, při kterém se měří napětí na akumulátoru a doba od začátku vybíjení až po pokles napětí akumulátoru na danou hranici. Celý test probíhá při teplotě 20 °C. Vybíjecí proud akumulátoru se označuje  $I_{10}$ , případně  $I_{20}$ . Tato hodnota je velice důležitou pro nabíjení akumulátorů.

Kapacita olověných akumulátorů není konstantní veličinou. Nejvíce je závislá na dvou parametrech:

1. Vybíjecí proud
2. Okolní teplota

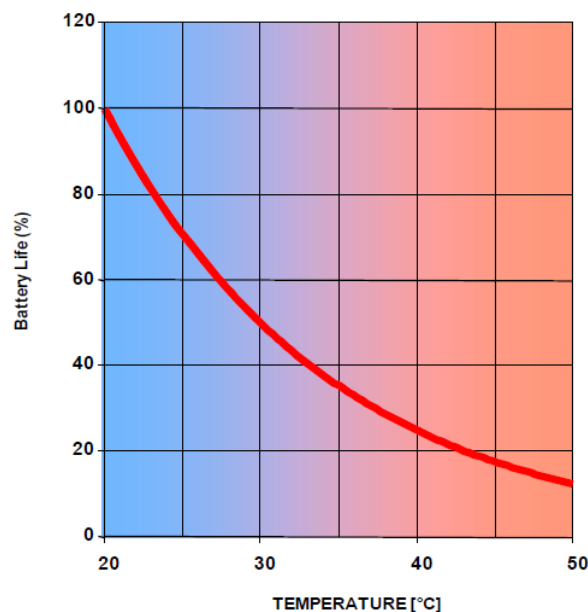
Závislost kapacity akumulátoru na vybíjecím proudu je znázorněna na obr. 11. Jako příklad můžeme uvést hodnoty akumulátoru 12FGL33 od firmy FIAMM, který má nominální kapacitu  $C_{10} = 30$  Ah. Nominální proud  $I_{10}$  je tedy roven 3 A, neboť je tímto proudem možné vybíjet akumulátor 10 hodin. Pokud by byla kapacita konstantní, mohli bychom tvrdit, že můžeme akumulátor vybíjet proudem 30 A po dobu 1 hodina. V technické dokumentaci k akumulátoru je však pro 1h vybíjecí test uveden vybíjecí proud  $I_1 = 20,7$  A, tedy kapacita

$C_1 = 20,7 \text{ Ah}$ . Pro korektní a opakovatelné měření jsou tedy zapotřebí stanovené striktní podmínky. Je to okolní teplota, vybíjecí proud a konečné napětí akumulátorů.



**Obr. 11 – Graf závislosti kapacity olověného akumulátoru na vybíjecím proudu [2 (fig. 1)]**

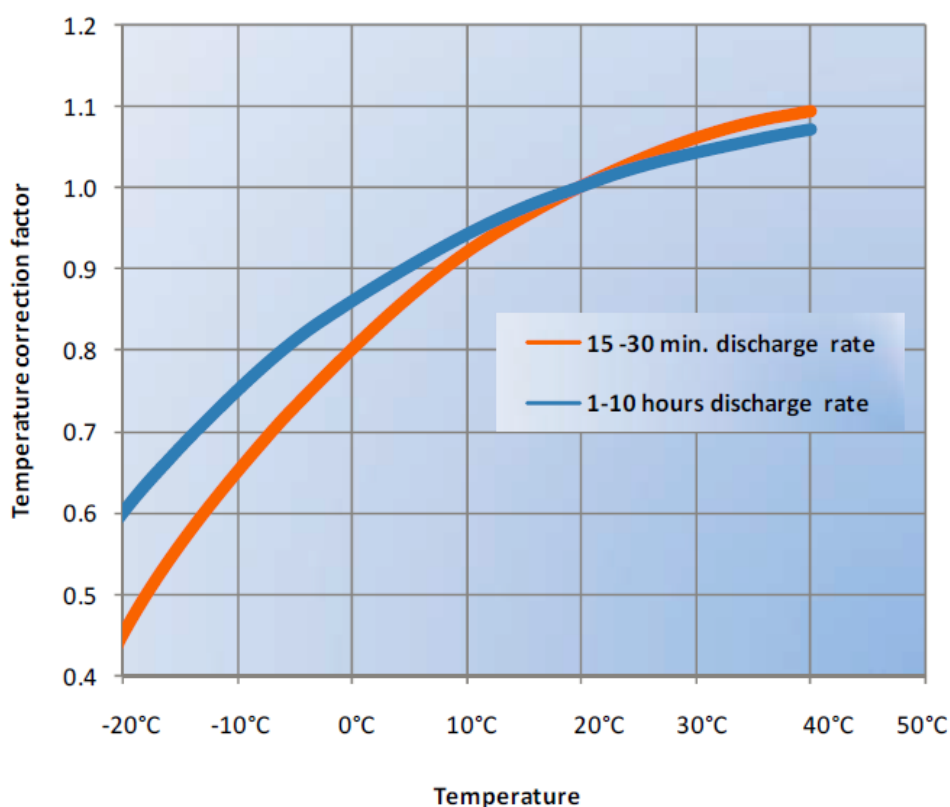
Pro dlouhodobé a bezúdržbové zálohovací systémy je podstatnou vlastností olověných akumulátorů jejich **celková životnost**, která zároveň ovlivňuje celkovou životnost zálohovacího systému. Cílem bezúdržbového a dlouhodobého zálohovacího systému je tedy docílit co nejdelší životnosti akumulátorů. Prvním a nejdůležitějším parametrem, který působí na životnost akumulátorů, je jejich okolní teplota. Závislost životnosti olověných AGM akumulátorů FIAMM na okolní teplotě je zobrazena na obr. 12.



**Obr. 12 – Graf závislosti životnosti olověných akumulátorů na okolní teplotě [2 (fig. 4)]**

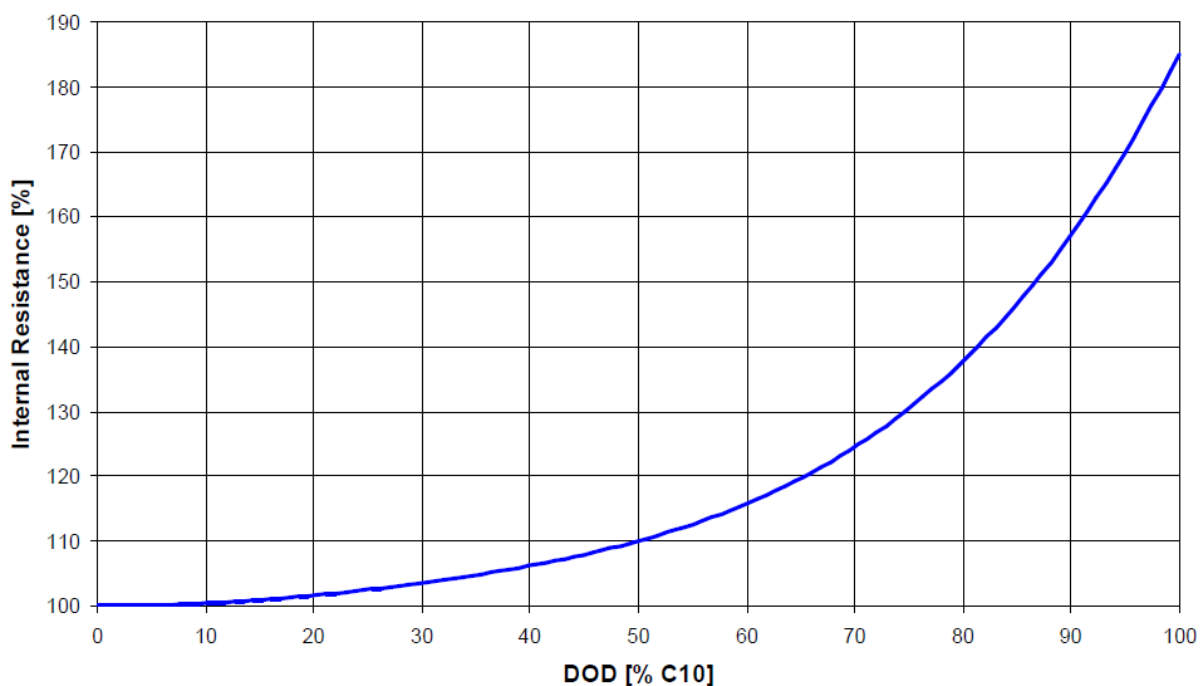


Z grafu obr. 12 je patrná exponenciální závislost a je z něj možné vyčíst, že při okolní teplotě 40 °C je celková životnost pouze čtvrtinová. Z tohoto důvodu jsou často prostory s uskladněnými akumulátory klimatizovány. S těmito předpoklady je nutné přistupovat také k návrhu zálohovacího systému, kdy je nutné stanovit priority, případně kompromis. Pokud požadujeme od akumulátoru co nejdelší životnost, skladujeme akumulátor při co nejnižší teplotě. Ztrácíme tím však razantně celkovou kapacitu. Naopak pokud bychom požadovali od akumulátoru co nejvyšší kapacitu, skladujeme akumulátor ve vysokých okolních teplotách, čímž však dochází k razantnímu snížení životnosti.



**Obr. 13 – Graf závislosti celkové kapacity olověných akumulátorů na okolní teplotě [2 (fig. 3)]**

Dalším parametrem, který charakterizuje vlastnosti olověných akumulátorů, je jejich **vnitřní odpor**. U olověných AGM akumulátorů je vnitřní odpor roven jednotkám miliohmů. Díky tomuto nízkému vnitřnímu odporu dochází u olověných akumulátorů k minimálnímu poklesu výstupního napětí při zatížení velkými proudy. Olověné akumulátory jsou proto brány jako tvrdé zdroje napětí. Vnitřní odpor olověných akumulátorů není konstantní veličina, nýbrž je ovlivněna okolními faktory. Vnitřní odpor akumulátoru se mění především s hloubkou vybití, v literatuře označované jako DoD (Depth of Discharge). Závislost vnitřního odporu akumulátoru na hloubce vybití je zobrazena na obr. 14. Vnitřní odpor akumulátorů je dále závislý na okolní teplotě. Čím nižší je okolní teplota akumulátoru, tím vyšší je vnitřní odpor. Tento jev je pozorovatelný u autobaterií, kdy zmrzlý akumulátor není schopen dodat díky zvýšenému vnitřnímu odporu dostatečný proud pro nastartování motoru. Pro možnosti diagnostiky je vnitřní odpor důležitou informací. Není však žádným výrobcem doloženo, jakým způsobem se mění vnitřní odpor s celkovou kapacitou akumulátoru. Pro možnosti diagnostiky se využívá nejen stejnosměrný vnitřní odpor, ale také vnitřní impedance. Její měření je obtížné a vyžaduje nezatížený akumulátor. [1], [2], [5]



**Obr. 14 – Graf závislosti vnitřního odporu akumulátoru na hloubce vybití [30 (fig. 11)]**

Důležité parametry pro provoz akumulátorů jsou **mezní nabíjecí a vybíjecí parametry**. Tyto parametry jsou umístěny vytištěny téměř na každém pouzdře akumulátoru, aby je bylo možné bezpečně používat i bez podrobné dokumentace. Jsou zde uvedeny tři základní parametry

1. Maximální nabíjecí proud  $I_{\text{charge}}$
2. Maximální nabíjecí napětí pro záložní (udržovací) režim  $U_{\text{float}}$
3. Maximální nabíjecí napětí pro cyklovací režim  $U_{\text{cycle}}$  ( $U_{\text{absorbition}}$ )

Všechny tyto parametry jsou udávány pro okolní teplotu  $t_{\text{amb}} = 20\text{ °C}$ , případně je na štítku zadán rozsah, ve kterém by se měl akumulátor pohybovat v průběhu celé své životnosti. Způsob nabíjení a vybíjení akumulátorů výrazně ovlivňuje jejich životnost. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.1, při dlouhodobém nabíjení akumulátorů napětím pro cyklovací režim, dochází ke ztrátě elektrolytu a tím také k celkové ztrátě kapacity. Životnost akumulátoru je tedy možné vyjádřit také v počtu vybíjecích a nabíjecích cyklů. Tento případ definování životnosti je využíván především při cyklickém využívání akumulátorů.

Pro návrh zálohovacího systému včetně nabíjecích a diagnostických metod byl vybrán akumulátor od firmy FIAMM typu 12FGL33, který má následující parametry:

- $C_{10} = 30\text{ Ah}$
- $I_{10} = 3\text{ Ah}$
- hmotnost 12 kg
- $U_{\text{float}} = 13,62\text{ V}$  ( $20\text{ °C}$ )
- $U_{\text{cycle}} = 14,4\text{ V}$  ( $20\text{ °C}$ )
- $I_{\text{charge\_max}} = C_{10} \cdot 0,25 = 7,5\text{ A}$
- životnost 10 let ( $20\text{ °C}$ )

### 2.2.3 Přehled nabíjecích algoritmů/přehled metod nabíjení akumulátorů

Olověné, ale i ostatní typy akumulátorů, se také nazývají zálohovací, neboť neslouží jako samostatný zdroj napětí, ale jako akumulátor elektrického náboje. Aby tedy mohl být akumulátor použit jako záložní zdroj elektrické energie, musíme do něj nejprve energii vložit. Tento proces se nazývá nabíjení a jeho implementace je nezbytnou součástí každého systému, který používá pro zálohování olověné akumulátory. Nabíjení akumulátorů je závislé především na jejich výrobní technologii, ale také na jejich velikosti. Vhodným nabíjením akumulátorů se dosahuje jejich maximální životnosti, udržují se stále nabitě a také je možné pomocí nabíjecích parametrů odhadnout jejich přibližnou aktuální kondici.

Nabíjení olověných akumulátorů je rozděleno na pět základních typů:

1. **Konstantní napětí** – anglické označení **CV** (constant voltage)
2. **Konstantní proud** – anglické označení **CC** (constant current)
3. **Konstantní proud/konstantní napětí** – anglické označení **CC/CV**
4. **Třístavový algoritmus** – anglické označení **3 stage charging algorithm**
5. **Pulzní nabíjení** – anglické označení **Pulse charging**

Existuje mnohem více různých typů nabíjení akumulátorů, které jsou vymyšleny experimentálně různými návrháři nabíjecích zdrojů, vše jsou to však pouze kombinace výše zmíněných pěti metod.

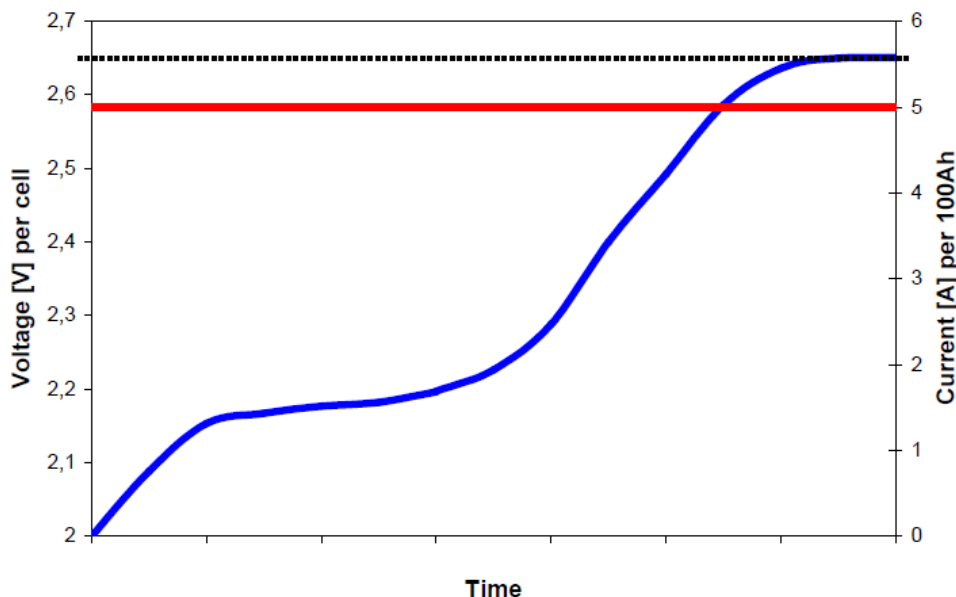
#### **Konstantní napětí**

Základním postupem pro nabití olověných akumulátorů je nabíjení konstantním napětím. Pokud je akumulátor vybitý, jeho vlastní napětí je např. pod úrovní  $U_{\text{batt}} < 12 \text{ V}$ , připojíme akumulátor na zdroj konstantního napětí. Velikost konstantního napětí je odvislá od počtu jednotlivých článků v akumulátoru. Je důležité, v jakém režimu olověný akumulátor využíváme. Pokud je akumulátor používán v zálohovacím (udržovacím) režimu, nastavíme napětí na hodnotu zálohovacího napětí  $U_{\text{floats}}$ , pro cyklický režim je nastavena hodnota napětí  $U_{\text{cycle}}$ . Po připojení začne do vybitého akumulátoru téct proud, který v extrémním případě omezuje pouze vnitřní odpor nabíjecího zdroje a vnitřní odpor olověného akumulátoru. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.2, olověné akumulátory mají omezený maximální nabíjecí proud v závislosti na jejich nominální kapacitě. Pokud dochází k jeho opakovanému překračování, dochází ke korozi elektrod akumulátoru a tím ke snižování celkové kapacity. Nabíjecí napěťový zdroj tedy musí mít proudové omezení na povolenou hodnotu nabíjecího proudu. Akumulátor je nabitý ve chvíli, kdy poklesne proud na minimální hodnotu a její pokles je téměř neměnný. [1]

#### **Konstantní proud**

Druhou metodou nabíjení olověných akumulátorů je nabíjení konstantním proudem. Při této metodě je akumulátor připojen ke konstantnímu zdroji proudu, jehož hodnota nesmí přesáhnout maximální povolenou hodnotu nabíjecího proudu. Konstantní proud dodává do akumulátoru elektrický náboj a tím začne růst napětí akumulátoru. Podle režimu využití akumulátoru je poté rozhodnuto, kdy je akumulátor nabit. Pokud bychom nechali akumulátor nabíjet konstantním proudem bez napěťového omezení, napětí akumulátoru by nekontrolovaně narůstalo. Zásadním problémem by v této fázi bylo plynování akumulátoru, které by se zvyšovalo s rostoucím napětím. Došlo by tak k nenávratnému poškození akumulátoru v důsledku úbytku uniklého elektrolytu. Nabíjecí cyklus je tedy ukončen při

dosažení úrovně cyklovacího napětí  $U_{\text{cycle}}$ . Průběh nabíjecího cyklu konstantním proudem je znázorněn na obr. 15.



**Obr. 15 – Nabíjecí cyklus konstantním proudem (napětí, proud) [5 (fig. 51)]**

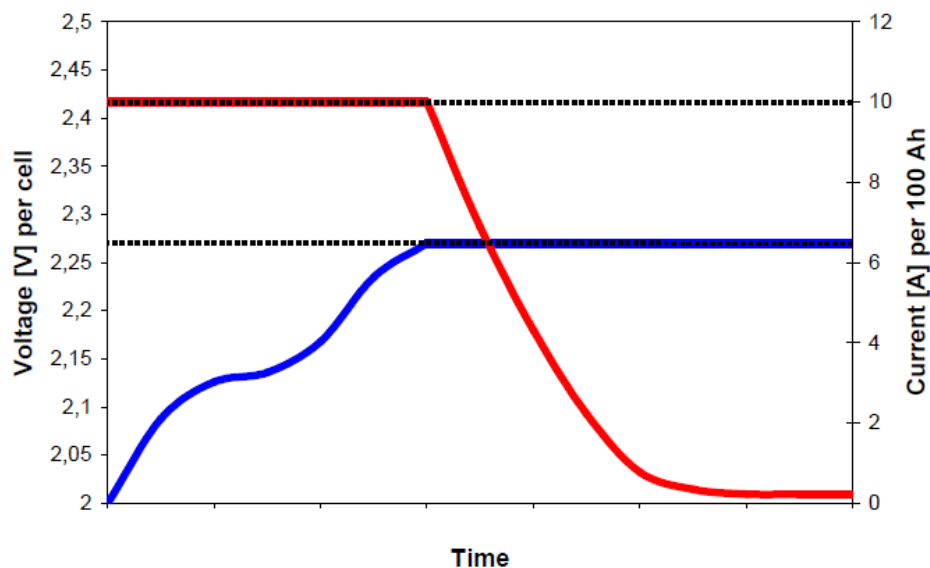
### Konstantní proud/konstantní napětí (CC/CV)

Kombinací nabíjecí metody konstantním napětím a konstantním proudem můžeme implementovat dvoustavový nabíjecí cyklus. Předchozími nabíjecími metodami lze akumulátory nabít pouze na úroveň 80 % kapacity a za dlouhý časový úsek. Pokud bychom nabíjeli konstantním proudem, nebo konstantním napětím na 100% kapacity, došlo by v rámci překročení povolených nabíjecích hodnot k poklesu životnosti. Kombinací je však možné nabít akumulátory mnohem rychleji a zároveň dosáhnout téměř nominální kapacity.

Ve dvoustavovém nabíjecím cyklu je akumulátor nejprve nabíjen konstantním proudem a následně konstantním napětím. Jako hodnota konstantního proudu je výrobci nejvíce doporučovaná hodnota  $I_{10}$ , tedy desetina nominální kapacity akumulátoru. Po připojení vybitého akumulátoru na dvoustavový nabíječ dojde ke zvyšování napětí akumulátoru. Přejít do druhého nabíjecího stavu je dán napětím akumulátoru. Zde záleží na režimu využití, tedy finální hodnota je buď  $U_{\text{float}}$ , nebo  $U_{\text{cycle}}$ . Po přechodu na konstantní napětí začne klesat proud a akumulátor dosáhne celkové kapacity při poklesu proudu na minimální hodnotu proudu, který se již téměř nemění. Tato mezní hodnota proudu je nejčastěji udávána jako desetina proudu  $I_{10}$ . Pro akumulátor Fiamm 12FGL33 se jedná proud 300 mA. Na konečném napětí akumulátoru je také závislá doba nabití akumulátoru. Pro cyklovací úroveň napětí je doba nabytí mnohem rychlejší, než pro udržovací režim. Průběh dvoustavového nabíjecího cyklu je znázorněn obr. 16. [1]

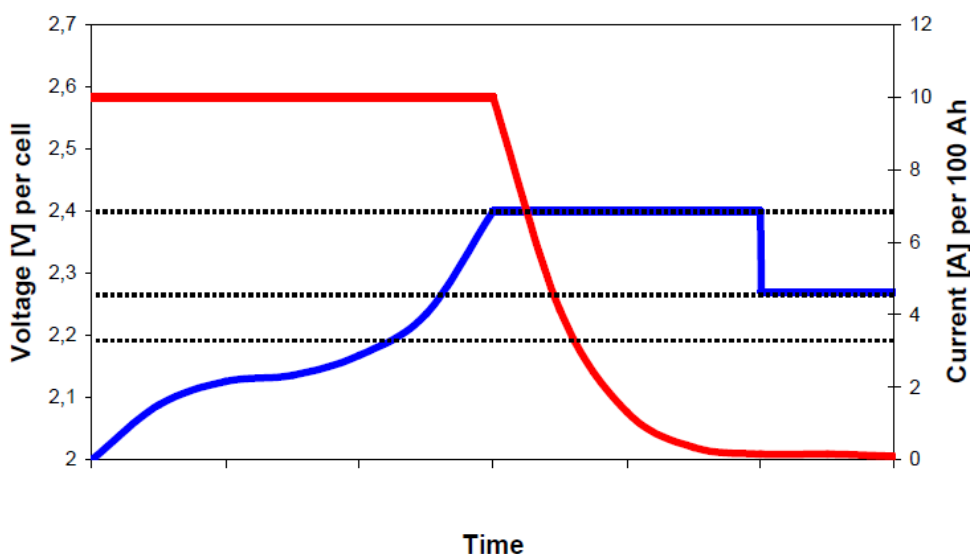
### Třístavový algoritmus

Nejpoužívanějším nabíjecím algoritmem nabíjecích zdrojů je tzv. třístavový algoritmus. Jedná se o nabíjecí cyklus složený z fáze konstantního proudu a konstantního napětí.



Obr. 16 – Průběh dvoustavového nabíjecího cyklu (napětí, proud) [5 (fig. 48)]

Konkrétně se jedná o konstantní proud, konstantní cyklovacího napětí a udržovacího (float) napětí (CC/CV/CV). Průběh třístavového nabíjecího cyklu je znázorněn obr. 17. Hlavní výhodou tohoto algoritmu je rychlé nabití akumulátoru na 100 % kapacity. Výrobci je tato doba udávána na 24 hodin, oproti dvoustavovému algoritmu s udržovacím napětím, kde je tato doba 48 hodin. První dvě fáze třístavového algoritmu jsou stejné jako u dvoustavového algoritmu pro napětí cyklovacího režimu. V první fázi CC, která trvá nejdéle, dojde k dobití akumulátoru na přibližně 80 % celkové kapacity. Ve druhé fázi dojde k dobití akumulátoru na úroveň kapacity přibližně 95 %. Do třetí fáze nabíjecího cyklu přejde nabíjecí zdroj v závislosti na nabíjecím proudu. Tato rozhodovací hranice je nejčastěji doporučována jako desetina proudu  $I_{10}$ . Při poklesu proudu pod tuto úroveň dojde k nabíjení akumulátoru konstantním udržovacím (float) napětím. Tato fáze trvá nejdéle a dochází zde k dobití posledních 5 % celkové kapacity. [1]

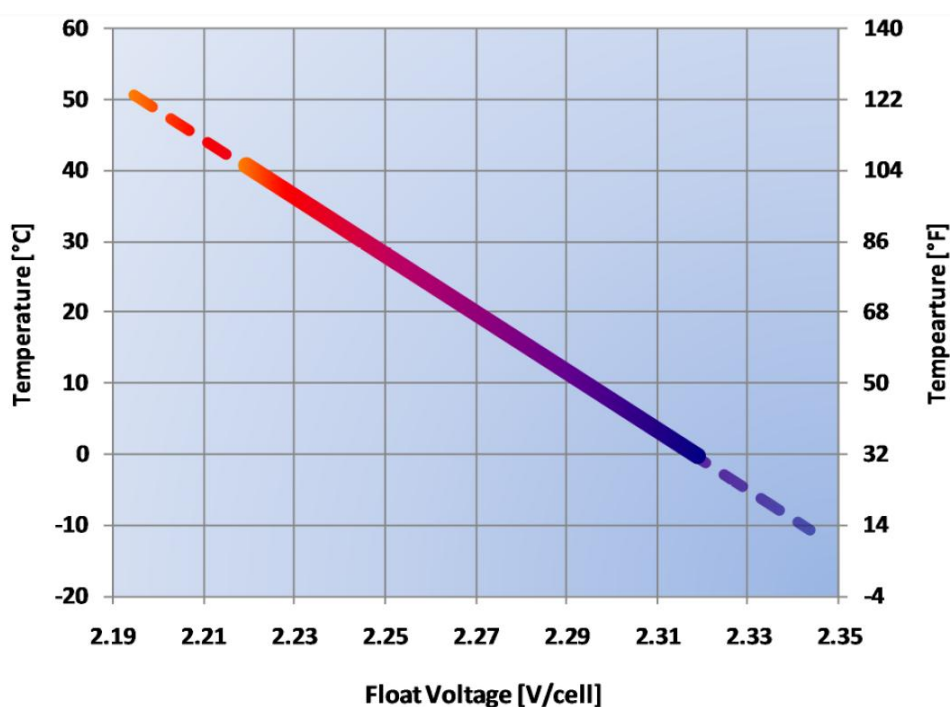


Obr. 17 – Průběh třístavového nabíjecího cyklu (napětí, proud) [5 (fig. 49)]

Stav plného nabití je indikován nabíjecím proudem, který odebírá akumulátor při float napětí. Tento proud je taktéž nazýván udržovací (float) a jeho hodnota bývá udávána výrobcem v závislosti na nominální kapacitě akumulátoru pro teplotu 20 °C. Pro akumulátor FIAMM 12FGL33 je tato hodnota

$$I_{float} = 0,3 \text{ mA/Ah}_{20} \Rightarrow I_{float} = 0,3 \cdot 33 = 9,9 \text{ mA} \quad (2.2.3/1)$$

Ve chvíli, kdy se proud tekoucí do akumulátoru ustálí na této hodnotě, můžeme tvrdit, že je akumulátor nabit na 100 % své kapacity. Jak již bylo v kapitole 2.2.2 zmíněno, hodnota vnitřního odporu akumulátoru se s okolní teplotou mění. Aby tedy tekla do plně nabitého akumulátoru stejný udržovací proud, musí se měnit hodnota udržovacího (float) napětí. Závislost udržovacího napětí na teplotě je obsažena v obr. 18. Tato korekce v závislosti na okolní teplotě přispívá pozitivně k celkové životnosti akumulátoru, neboť nedochází k podbíjení, či přebíjení akumulátorů. [1]



**Obr. 18 – Závislost udržovacího (float) napětí na okolní teplotě akumulátoru [2 (fig. 6)]**

Posledním základním typem nabíjení olověných akumulátorů je pulzní nabíjení. Jedná se o nabíjení proudovými pulzy o zvolené frekvenci. Pozitivní, či negativní účinky tohoto způsobu nabíjení se u výrobců liší. Jako výhoda se nejčastěji udává pozitivní vliv na údržbu elektrod v akumulátoru, kdy může docházet k jejich očištění od usazeného oxidu olova a koroze. Jako udržovací nabíjecí cyklus se také udává pulzní nabíjení konstantním napětím s periodou 3 měsíce. V základu se jedná o krátké řízené přebíjení akumulátorů plynovacím napětím. Dle výrobců akumulátorů v tomto cyklu dochází díky plynování k očištění elektrod a tím k prodloužení celkové životnosti akumulátoru.

## 2.3 Rozbor diagnostických metod olověných akumulátorů

### 2.3.1 Popis jednotlivých možností diagnostikování stavu olověných akumulátorů

Aby mohl být zálohovací systém označen jako bezúdržbový, musí implementovat diagnostický systém, díky kterému dokáže zjistit aktuální stav olověných akumulátorů. Tím je zajištěna nejen bezpečnost systému, neboť nedojde k chybě systému v důsledku vadného akumulátoru, ale také snížení nákladů na provoz systému, neboť není nutné provádět časté pravidelné výměny olověných akumulátorů. Ačkoliv u systému s nejvyšším stupněm zabezpečení se jedná o jedinou 100% metodu, jakým způsobem zajistit dlouhodobou bezchybnost systému.

Základním předpokladem při návrhu diagnostického systému je určení hranice, při které považujeme funkci akumulátoru za chybovou. Základním parametrem akumulátorů je jejich celková kapacita a s tou je také spojena jejich celková životnost, protože v průběhu životního cyklu kapacita stále klesá. Výrobci akumulátorů proto udávají konec životního cyklu akumulátoru jako pokles celkové kapacity akumulátoru na 80 % nominální kapacity. Určení této hranice souvisí s chováním akumulátoru při nabíjení a vybíjení, které nelze přesně definovat. Například u akumulátorů s 80 % nominální kapacity může docházet k rozdílně rychlému vybíjení, případně se může lišit charakter vybíjecí křivky. [2]

Pokud tedy považujeme za hranici použitelnosti 80 % nominální kapacity při plném nabití, musíme v rámci diagnostiky sledovat veškeré parametry, které ovlivňují právě celkovou kapacitu akumulátoru. Hlavním parametrem, který nejvíce ovlivňuje celkovou kapacitu, je okolní teplota. Informace o teplotě je podstatná jak pro nabíjení akumulátoru, tak také pro odhadování celkové životnosti. Jednou z možností, jak teplotu zaneść do celkové kalkulace diagnostického systému, je pravidelně zaznamenávat její hodnotu a ze známé závislosti celkové kapacity na okolní teplotě odhadnout celkový úbytek kapacity.

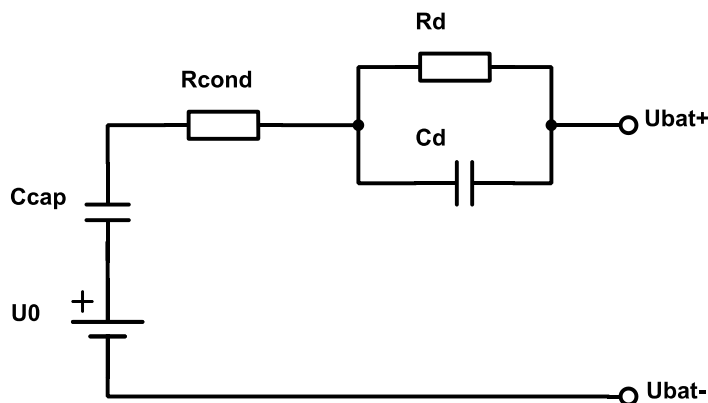
Diagnostické metody akumulátorů nejsou příliš často publikované, neboť se jedná ve většině případů o hlavní firemní tajemství. Jednotlivé navržené metody a předpoklady je tedy nutné experimentálně ověřit ideálně na konkrétní typ akumulátoru. Problém je však s celkovou životností akumulátoru, která je běžně 10 let a diagnostické testy jsou proto velmi časově náročné. S těmito předpoklady byly také navrženy následující diagnostické postupy, které pramení z různých volných referenčních materiálů firem zabývajících se zálohovacími systémy s olověnými akumulátory a také z vlastních úvah, odvozených ze standardně popsaných parametrů olověných akumulátorů.

Nejjednodušším způsobem, jak zjistit celkovou kapacitu akumulátoru, je vybíjecí test. Vybíjí se konstantním proudem, pro který má akumulátor výrobcem definovanou nominální kapacitu. V průběhu vybíjení se měří čas, než poklesne napětí akumulátoru na danou hodnotu. Tato hodnota je nejčastěji udávána jako 10,5 V pro 12V akumulátor. Při překročení této hodnoty může docházet k nevratným dějům v akumulátoru. Pokud jsou dodrženy podmínky pro testování, pak je výsledkem celkovou kapacitu akumulátoru. U tohoto testu je však problém se samotným vybíjením, neboť je po testu akumulátor nepoužitelný. Pro diagnostické účely je však možné využít částečných, případně pulzních vybíjecích cyklů. V tomto případě není výsledkem konkrétní hodnota kapacity, ale určitý poměr mezi aktuální a nominální hodnotou, která byla změřena na počátku pracovního cyklu akumulátoru. Porovnanou hodnotou může být rychlost vybití, případně odezva na zatěžovací pulz. [1]

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, pro odhad celkové životnosti akumulátoru jako pokles celkové kapacity na 80 % nominální kapacity, postačí porovnávat aktuální změřené parametry s referenčními hodnotami, které jsou změřeny na začátku pracovního cyklu v zálohovacím systému. Díky tomuto předpokladu není nutné uvažovat měření absolutní hodnoty celkové kapacity, nýbrž je možné porovnávat parametry, které jsou závislé na celkové kapacitě.

V kapitole 2.3.2 byla popsána závislost vnitřního odporu akumulátoru na okolní teplotě a na hloubce vybití. Od žádného výrobce akumulátorů však není poskytnutá závislost vnitřního odporu na celkové kapacitě akumulátoru. Pokud by byla tato závislost součástí dokumentace k olověným akumulátorům, návrh diagnostického systému by se výrazně zjednodušil. Využití vnitřního odporu akumulátorů pro diagnostiku však není tímto vyloučeno. Základním problémem je závislost vnitřního odporu na několika faktorech, viz kapitola 2.2.2. Měření vnitřního odporu ovlivňuje výrazně okolní teplota a stav nabití akumulátoru. Pokud je však měření přizpůsobeno tak, aby byly tyto parametry vždy stejné, je možné docílit reprodukovatelných výsledků a tím sledovat změnu vnitřního odporu v průběhu celého životního cyklu akumulátoru.

Využití měření vnitřního odporu olověných akumulátorů vychází z vlastností jeho náhradního schématu. Náhradních zapojení olověných akumulátorů je mnoho, nejvíce je však využíván díky své přehlednosti vnitřní model olověného akumulátoru se soustředěnými parametry, viz obr. 19. Zdroj  $U_0$  reprezentuje ideální zdroj stejnosměrného napětí, kondenzátor  $C_{cap}$  reprezentuje celkovou vnitřní kapacitu akumulátoru, rezistor  $R_{cond}$  obsahuje celkový elektrický odpor vodivé části akumulátoru a paralelní kombinace rezistoru  $R_d$  a kondenzátoru  $C_d$  reprezentuje difuzi elektrolytu v akumulátoru, kterou si lze představit jako kapacitní přechod mezi elektrolytem a elektrodou v akumulátoru. [31]

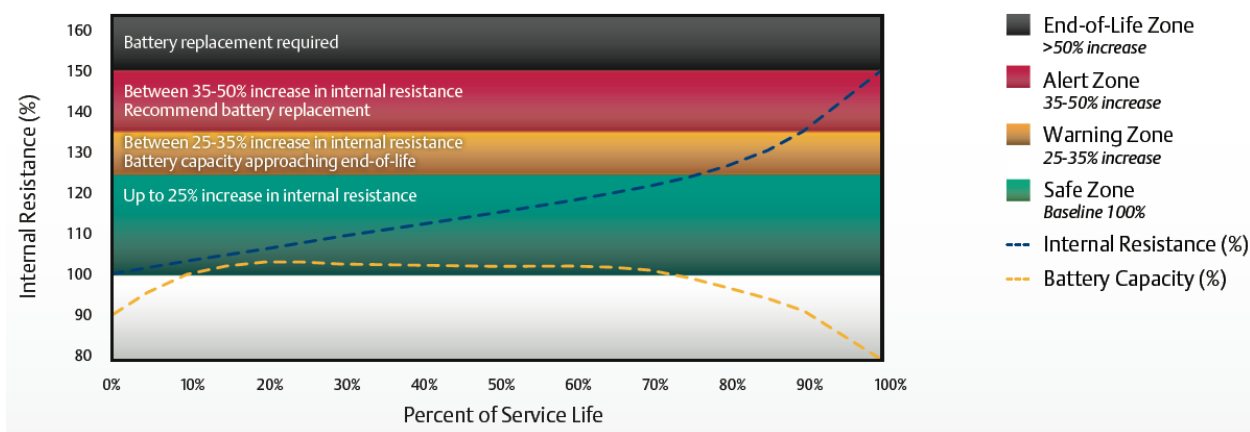


**Obr. 19 – Vnitřní model olověného akumulátoru se soustředěnými parametry [31]**

V průběhu pracovního cyklu akumulátoru dochází v důsledku chemických procesů ke korozi a zanášení elektrod oxidem olova. Tímto jevem dochází ke snížení aktivní plochy elektrod, které nejsou dále schopné chemických procesů v plném rozsahu jako u nového akumulátoru a následně dochází ke snížení celkové kapacity. Zmenšením aktivní plochy také dochází ke snížení vodivosti elektrod, tedy zvýšení odporu vodivé části akumulátoru. Pokud je tedy uvažováno snížení celkové kapacity v důsledku snížení vodivosti elektrod, je možné uvažovat ovlivnění prvků ve vnitřním modelu akumulátoru. Snížení vodivosti elektrod by se nejvíce projevilo na vnitřním odporu  $R_{cond}$ , který právě reprezentuje celkovou vnitřní vodivost akumulátoru. Výsledkem by byla možnost měřit změnu celkové kapacity akumulátoru jako změnu parametru  $R_{cond}$ .



Výše uvedená úvaha není bohužel žádným výrobcem akumulátorů zmiňovaná. Důvodem může být nejistá definice závislosti vnitřního odporu na celkové kapacitě akumulátoru pro obecnou výrobní řadu, neboť se akumulátory vyrábějí s výraznými tolerancemi vlastních parametrů, jako například vnitřní odpor a nominální kapacita. Specializované firmy na zálohovací systémy s olověnými akumulátory však mají možnost zpracovat dlouhodobá měření a výsledkem je například závislost obr. 20, která jasně udává, jakým způsobem se mění vnitřní odpor akumulátoru s celkovou kapacitou. Výsledkem je tedy tvrzení, kdy poklesu celkové kapacity olověného akumulátoru o 20 % odpovídá nárůst vnitřního odporu o 50 %. [31]



**Obr. 20 – Závislost vnitřního odporu akumulátoru na jeho celkové kapacitě [31 (fig. 12)]**

Ověření tohoto tvrzení vyžaduje dlouhodobá měření olověných akumulátorů v provozu, při různých fázích životního cyklu. Výsledkem však může být výše zmíněné tvrzení, které zásadně zjednoduší návrh diagnostického systému.

S vnitřním odporem akumulátoru jsou také spojeny vnitřní ztráty akumulátoru, které způsobují jeho samovybíjení. V kapitole 2.2.3 bylo zmíněno udržovací (float) napětí a proud, které udržují akumulátor v plně nabitém stavu. Toho tento nabíjecí cyklus dosahuje pomocí udržovacího proudu, který kompenzuje vnitřní ztráty akumulátoru. Pokud uvažujeme tvrzení, kdy jsou vnitřní ztráty akumulátoru úměrné jeho vnitřní vodivosti, pak můžeme dle tvrzení o závislosti vnitřního odporu na celkové kapacitě tvrdit, že jsou vnitřní ztráty také úměrné celkové kapacitě akumulátoru. Změnou udržovacího proudu akumulátoru je poté možné měřit změnu vnitřní kapacity. Testování této metody je stejně časově obtížné jako měření pomocí vnitřního odporu, její aplikace je však také velmi jednoduše implementovatelná.

Zálohovací systém, pro který je navrhována diagnostika, implementuje zálohování pomocí čtyř olověných akumulátorů zapojených v sérii. Pokud jsou měřeny parametry každého akumulátoru zvlášť, je možné pomocí porovnání jednotlivých provozních parametrů určit vadný akumulátor. Jedná se například o rychlejší pokles napětí na akumulátoru při vybíjení a rychlejší nárůst napětí při nabíjení. Dále se jedná o porovnání vnitřních odporů s ostatními akumulátory v sérii. Diagnostický systém je také možné využít pro detekci fatálních chyb akumulátorů, jako je zkratování či přerušování článku. Zkratování je možné detekovat pomocí snížení nominálního napětí akumulátoru a přerušování pomocí přerušování toku proudu.

Shrnutí použitelných diagnostických metod olověných akumulátorů:

- Měření vnitřního odporu

- Měření udržovacího (float) proudu
- Záznam okolní teploty akumulátoru a odhad celkové životnosti
- Porovnání nabíjecích a vybíjecích parametrů mezi akumulátory
- Měření zkratovaného článku
- Měření přerušovaného článku

### 2.3.2 Měření parametrů olověných akumulátorů pro diagnostiku jejich stavu

#### Nabíjecí a vybíjecí proud

Měření proudu, který při nabíjení vtéká do baterie a při vybíjení vytéká ven, je podstatnou částí testovacího modulu. Pro možnosti testování a sbírání kvalitních dat pro diagnostiku je potřeba měřit proud pro oba pracovní režimy baterie, tedy nabíjení a vybíjení. První úlohou je měření vybíjecího proudu. Ten je potřebný měřit pro možnosti diagnostiky, jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách.

Vybíjecí proud závisí na nominální kapacitě akumulátoru. Pro testované akumulátory FIAMM 12FGL33 se pro výpočet nominální kapacity  $C_{10}$  používá vybíjecí test, kdy se akumulátory vybíjí proudem rovným desetinaš nominální kapacity po dobu 10 hodin (proto se nominální kapacita označuje jako  $C_{10}$ , případně  $C_{20}$  pro 20 hodin). Vybíjecí proud je tedy 3,3 A. Takový proud je však možné použít pouze pro měření v laboratorních podmínkách, kdy je možné měřit 10 hodin a více. U zálohovacích bezúdržbových systémů takové testy nejsou možné, neboť je důležité, aby byly akumulátory stále v pohotovosti pro možné zálohování systému.

Pro návrh obvodu měření vybíjecího proudu je nutné si uvědomit, že nový akumulátor může mít vnitřní odpor přibližně 10 mΩ. Při zatížení akumulátoru proudem 3,3 A dojde na výstupu akumulátoru v důsledku nenulového vnitřního odporu k poklesu napětí

$$\Delta U_{aku} = I_{disch} \cdot R_{int} = 3,3 \cdot 0,01 = 0,033 \text{ V} = 33 \text{ mV} \quad (2.3.2/1)$$

Takový pokles napětí je velice malá hodnota pro možné další zpracování A/D převodníky v diagnostických systémech v provozu, kde dochází k výraznému rušení. Důležité je si také uvědomit, že se jedná o pokles napětí daný celkovým vnitřním odporem. Pokud ale chceme měřit vnitřní odpor s rozlišením na 1 mΩ, úbytek napětí je poté pouze

$$\Delta U_{aku} = I_{disch} \cdot R_{int} = 3,3 \cdot 0,001 = 0,0033 \text{ V} = 3,3 \text{ mV} \quad (2.3.2/2)$$

Aby bylo možné s běžně dostupnými součástkami v zálohovacím systému korektně měřit celkovou kapacitu a vnitřní odpor, je nutné použít vyšší vybíjecí proud. Tím je možné měřit celkovou kapacitu pomocí zkráceného vybíjecího testu, případně pomocí částečného testu, kde se porovnávají naměřené hodnoty s referenčním měřením.

Požadavkem pro obvod měření vybíjecího proudu je maximální vybíjecí proud 14 A. Tato hodnota je určena jako maximální proudový odběr cílového zálohovaného systému. Pro příklad výpočtu uvažujeme zatěžovací (vybíjecí) proud roven 10 A. Pro nový akumulátor s vnitřním odporem přibližně 10 mΩ dojde při zatížení proudem 10 A k poklesu napětí

$$\Delta U_{aku} = I_{disch} \cdot R_{int} = 10 \cdot 0,01 = 0,1 \text{ V} = 100 \text{ mV} \quad (2.3.2/3)$$

Jedná se tedy o trojnásobně větší hodnotu, než při vybíjení 3,3 A. Je tedy možné trojnásobně zvýšit rozlišení měření vnitřního odporu. Měření vybíjecího proudu je tedy nutné dimenzovat na proudy do 14 A. Měření nabíjecího a vybíjecího proudu postačuje měřit s poměrně nízkým rozlišením, řádově 5 %. Pokud chceme měřit vnitřní odpor s rozlišením na 1 mΩ a měření napětí považujeme za absolutně přesné, postačuje měřit vybíjecí proud s rozlišením:

$$U_{aku\_10m\Omega} = I_{disc h} \cdot R_{int} = 10 \cdot 0,01 = 0,1 V = 100 mV \quad (2.3.2/4)$$

$$U_{aku\_11m\Omega} = I_{disc h} \cdot R_{int} = 10 \cdot 0,011 = 0,11 V = 110 mV \quad (2.3.2/5)$$

$$\Delta U_{aku\_1m\Omega} = U_{aku\_11m\Omega} - U_{aku\_10m\Omega} = 0,11 - 0,1 = 0,01 V = 10 mV \quad (2.3.2/6)$$

Chybové rozlišení nastává ve chvíli, kdy je stejný úbytek napětí roven odlišnému vnitřnímu odporu o 1 mΩ

$$I_{disc h\_10m\Omega} = \frac{U_{aku\_10m\Omega}}{R_{int}} = \frac{0,01}{0,01} = 1 A \quad (2.3.2/7)$$

$$I_{disc h\_11m\Omega} = \frac{U_{aku\_10m\Omega}}{R_{int}} = \frac{0,01}{0,011} \cong 0,909 A \quad (2.3.2/8)$$

$$\Delta I_{disc h\_1m\Omega} = I_{disc h\_10m\Omega} - I_{disc h\_11m\Omega} \cong 1 - 0,909 = 91 mA \quad (2.3.2/9)$$

Obvod měření vybíjecího proudu je tedy nutné navrhnout s minimálním rozlišením  $\pm 91 mA$ .

Druhou úlohou je měření nabíjecího proudu. Přesnost měření nabíjecího proudu udává, jak přesně je možné nabíjet akumulátor a také jak přesně je možné diagnostikovat akumulátor. Při nabíjení akumulátorů nabývá nabíjecí proud dvou základních rozmezí, viz kapitola 2.3.3. Pro námi používané akumulátory s kapacitou  $C_{10} = 30 Ah$  je doporučený nabíjecí proud roven  $I_{10} = 3 A$ . Tímto konstantním proudem se nabíjí akumulátor v první fázi nabíjecího cyklu. Je tedy důležité, aby byl proud měřený s danou přesností pro korektní nabíjení. Dle normy DIN 41772 je povolené zvlnění nabíjecího proudu ve fázi konstantního proudu rovno  $\pm 1 \%$ . Maximální přípustné zvlnění proudu pro zmíněnou normu je tedy

$$I_{Boost\_pp\_max} = I_{Boost} \cdot 0,01 = 3 \cdot 0,01 = 0,03 A = 30 mA \quad (2.3.2/10)$$

Obvod měření nabíjecího proudu je tedy nutné navrhnout s minimálním rozlišením  $\pm 30 mA$ .

Druhé rozmezí nabíjecích proudů se uplatňuje při udržovacím (float) nabíjení, jehož měření je použitelné pro diagnostiku stavu akumulátorů, viz kapitola 2.4.1. Zásadní problém se naskytá v požadavcích na bezpečnost diagnostického systému. Aby byl minimalizován počet snímacích prvků v proudové cestě zálohovacího systému, je pro měření vybíjecích a nabíjecích proudů použit pouze jeden odporový snímací prvek. Toto řešení není pro obvod měření proudu s širokým rozsahem ideální, avšak u bezpečnostních systémů je kladen důraz na co nejmenší počet prvků, které jsou namáhány vysokými výkony a v systému jsou umístěny na pozici, kde jejich poškození může způsobit totální selhání systému. V tomto případě se jedná o odpojení baterií od zálohovacího systému v důsledku poškození (rozpojení) snímacího odporového článku proudu.

Problém s měřením proudu v zálohovacím systému je tedy v základním požadavku, který vyplynul z bezpečnostních opatření v systému. Zálohovací systém musí měřit ideálně na jednom výkonovém snímacím prvku proud pro nabíjecí a vybíjecí pracovní fázi systému.

Cílem je tedy navrhnout obvod pro snímání proudu na jednom snímacím rezistoru s kladnou a zápornou orientací v širokém rozmezí hodnot ( $I_{\max} = 14 \text{ A}$ ) a s rozlišením měření  $\pm 1 \text{ mA}$  v rozmezí  $0 - 200 \text{ mA}$ .

### Napětí jednotlivých akumulátorů

Stejně jako měření proudu je měření napětí akumulátorů nedílnou součástí každého nabíjecího zdroje, případně diagnostické jednotky olověných akumulátorů. Měření napětí jednotlivých akumulátorů, případně celého akumulátorového balíku, primárně slouží pro možnost správně nabíjet akumulátory. Nabíjecí algoritmy mají striktně dáno, jaké jsou mezní napětí při nabíjení a jakým způsobem se musí měnit nabíjecí napětí s měnící se teplotou. Dále je měření na jednotlivých akumulátorech využíváno pro diagnostiku stavu jednotlivých akumulátorů v akumulátorovém balíku, viz kapitola 2.4.1. Pro možnosti ověření diagnostických metod je tedy požadavkem návrh obvodu měření napětí na každém akumulátoru zvlášť.

Požadavky na měření napětí akumulátorů jsou odvislé od jejich základních vlastností a zároveň od požadavků zálohovacího systému. Jelikož je výrobcí při vybíjení doporučeno odpojení akumulátorů při poklesu napětí jednotlivého akumulátoru na  $U_{\text{batt\_min}} = 10,5 \text{ V}$ , a zároveň nesmíme překročit úroveň plynovacího napětí, které je rovno  $U_{\text{batt\_max}} = 14,4 \text{ V}$ , můžeme stanovit napěťový rozsah v rozmezí  $U_{\text{batt\_meas}} = \langle 10,15 \rangle \text{ V}$ . Dále je podstatné, jaký je pro měřicí obvod napětí požadavek na minimální rozlišení. Tento požadavek je určen především požadavkem na změnu udržovacího (float) napětí podle okolní teploty. Dle výrobce [2], má být float napětí závislé na okolní teplotě dle vztahu

$$+1^{\circ}\text{C} = -2,5 \text{ mV}/\text{článek} \quad (2.3.2/11)$$

Znamená to tedy, že při nárůstu teploty o  $1^{\circ}\text{C}$  od referenční teploty, která je rovna  $20^{\circ}\text{C}$ , musí dojít na 12V akumulátoru k poklesu float napětí od referenční hodnoty  $U_{\text{float } 20^{\circ}\text{C}} = 13,62 \text{ V}$ , o  $-15 \text{ mV}$ , neboť se jedná o šestičlánekový akumulátor. Celý akumulátorový balík má tedy následující teplotní závislost float napětí

$$+1^{\circ}\text{C} = -2,5 \text{ mV}/\text{článek} = -15 \text{ mV}/12\text{V}_{\text{aku}} = -60 \text{ mV}/48\text{V}_{\text{aku\_bal}} \quad (2.3.2/12)$$

Minimální rozlišení měřicího obvodu napětí by tedy pro jeden 12V akumulátor mělo být  $U_{\text{res\_aku}} = 15 \text{ mV}$  a pro celý akumulátorový balík  $U_{\text{res\_aku\_bal}} = 60 \text{ mV}$ . Díky tomu pak bude možné korektně nabíjet akumulátory a prodlužovat tak jejich životnost, neboť nebude docházet k jejich podbíjení ani přebíjení. [2]

### Okolní teplota akumulátorů

Aby bylo možné korektně nabíjet olověné akumulátory, musí mít testovací modul olověných akumulátorů informaci o jejich okolní teplotě. Především se jedná o korekci udržovacího (float) napětí. Pokud by toto napětí nebylo upravováno dle teploty, docházelo k přebíjení, nebo podbíjení akumulátorů. Docházelo by tím ke snižování jejich celkové životnosti. Teplotní závislost udržovacího napětí akumulátorů je uvedena výše v popisu měření napětí. Požadavkem na měření teploty je tedy rozlišení na  $1^{\circ}\text{C}$ , v teplotním rozmezí  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $80^{\circ}\text{C}$ .

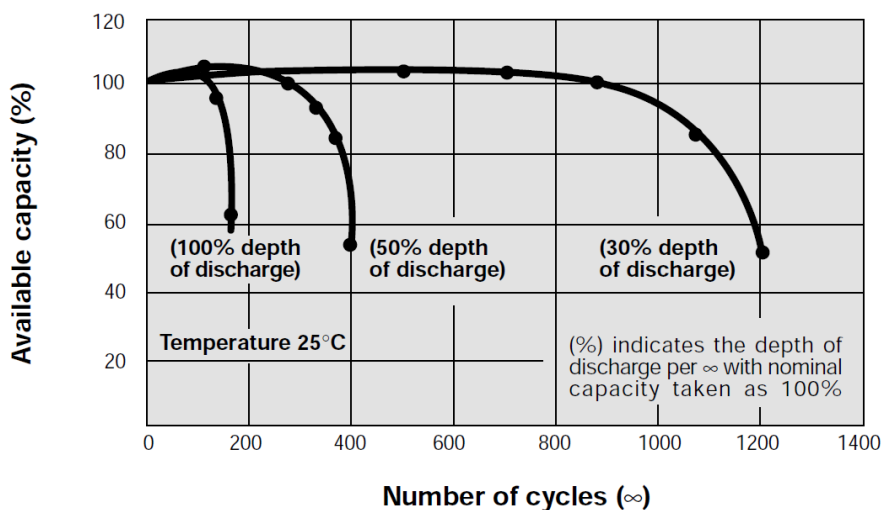
V kapitole 2.2.3 je popsáno, jakým způsobem ovlivňuje pracovní teplota akumulátorů jejich celkovou životnost. Pro možnosti diagnostiky olověných akumulátorů je tak nutné mít informaci o teplotě, díky které můžeme v průběhu pracovního cyklu aproximovat celkovou zbývající životnost.

### 2.3.3 Měření životního cyklu a jeho simulace

Pro možnosti testování diagnostických metod je nutné u testovaných akumulátorů měnit jejich celkovou kapacitu, aby bylo možné sledovat jejich postupnou změnu vlastností. Jedná se tedy o postupný posuv fáze životního cyklu olověného akumulátoru až po stav, kdy je akumulátor považován za vadný.

Základní životní cyklus, který je u testovaných baterií FIAMM 12FGL33 roven 12 let, odpovídá pouze specifickému využití akumulátoru. Jedná se o použití akumulátoru v zálohovacím (float) režimu, kdy je při konstantní teplotě 20 °C udržován plně nabitý pomocí float nabíječe a není vybíjen žádnou externí zátěží. Jedná se tedy o nejlepší podmínky, ve kterých může akumulátor pracovat. I tak však dochází u akumulátoru k postupnému poklesu celkové kapacity v důsledku opotřebování elektrod udržovacím nabíjením a také v důsledku chemických procesů při kompenzaci vnitřních ztrát akumulátoru. Jedná se však o zaručený způsob přesného určení životnosti akumulátoru. Hlavním problémem je extrémní časová náročnost, kdy není možné například testovat nově vyvinutý akumulátor 12 let a až poté ho dodat na trh s veškerou dokumentací. Jsou tedy nutné metody pro urychlení životního cyklu.

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2.2, největší efekt na celkovou životnost akumulátoru má jeho okolní teplota. Proto první metodou, která urychluje životní cyklus akumulátoru, je testování akumulátorů ve vysokých teplotách. Z teplotní závislosti obr. 21 je možné určit, že při okolní teplotě akumulátoru 60 °C má již akumulátor pouze 10 % své nominální kapacity. Pro akumulátory FIAMM 12FGL33 se tak například jedná o životnost 1,2 roku. Celkovou životnost je zpětně možné vypočítat pomocí teplotní závislosti obr. 21.

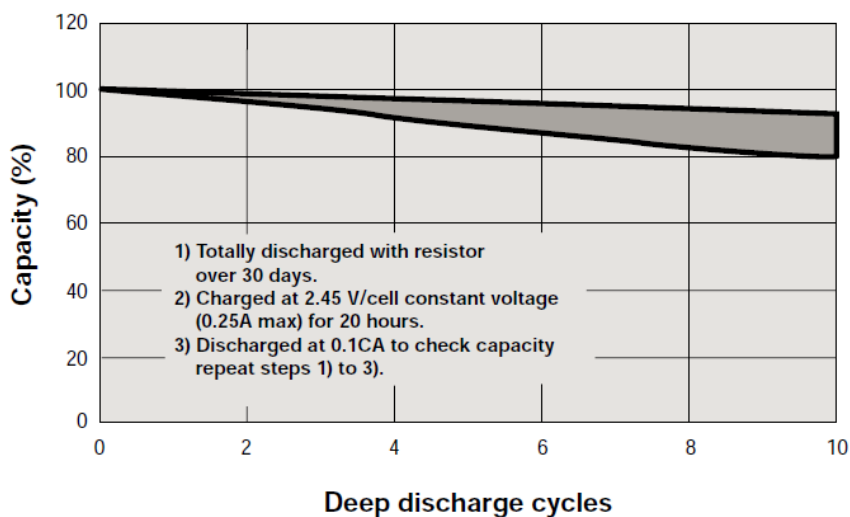


**Obr. 21 – Závislost celkové kapacity akumulátoru na počtu pracovních cyklů [30 (fig. 12)]**

Pro akumulátory, které jsou používány v cyklovacím režimu, se životnost neudává v letech, nýbrž v cyklech. Akumulátor v cyklovacím pracovním režimu totiž není striktně využíván tak, aby vydržel funkční co nejdéle, nýbrž aby byl schopen vykonat co nejvíce cyklů v libovolně dlouhém časovém intervalu. Jeden cyklus je reprezentován jako vybití akumulátoru na danou hloubku vybití DoD (Depth of Discharge) a jeho následné nabití na 100 % celkové kapacity. Tato reprezentace má stejnou identifikaci vadného akumulátoru. Taktéž se jedná o pokles celkové kapacity na 80 % nominální. Na obr. 21 je zobrazeno, jak

klesá celková kapacita s počtem cyklů. Dále je zde zobrazena silná závislost celkové životnosti na hloubce vybití. Například je patrné, že při DoD = 30 % je počet cyklů přibližně 1100. Pro DoD = 50 % se však již jedná o necelých 400 cyklů. [30]

I tato metoda simulace životního cyklu akumulátoru je velmi časově náročná. Pro standardní hloubku vybití se jedná o 1100 cyklů, kde každý trvá přibližně 24 hodin. Celková doba testování akumulátoru při nepřetržitém běhu je poté přibližně rovna 3 rokům. Z časových důvodů výhodnější metodou je použití cyklů s tzv. totálním vybitím. Akumulátor je u této metody vybíjen tak dlouho, dokud neklesne jeho svorkové napětí na přibližně 0 V. Na charakteristice obr. 22 je patrné, jak výrazně klesá celková kapacita s jednotkami hlubokých vybíjecích cyklů. Celková životnost akumulátoru udána v hlubokých cyklech je tedy rovna přibližně 10 cyklům. Jak je také v obr. 22 napsáno, jeden hluboký cyklus odpovídá 31 dnům. Rezistorem se kompletně vybíjí akumulátor 30 dní a ve 31. dni dojde k dobití akumulátoru. Celková doba simulace životnosti akumulátoru by tak u této metody byla rovna 310 dnům, tedy necelému jednomu roku. [30]



**Obr. 22 – Závislost celkové kapacity akumulátoru na počtu cyklů s hlubokým vybitím [30, Fig. 14]**

Alternativní možností k výše zmíněným metodám simulace životního cyklu je jejich vzájemná kombinace. Jedná se především o metodu, kdy se provádí test životnosti pomocí cyklování ve vysokých okolních teplotách. Zpětnou aproximací lze poté zjistit celkovou životnost, výrobci však tuto metodu neuvádějí, neboť také není popsána normou, podle které musí výrobci stanovit životnost vyrobených akumulátorů. Tuto kombinovanou metodu není příliš výhodné použít pro stanovení konkrétní hodnoty životnosti, avšak je výhodná pro rychlé odsimulování části životního cyklu. To je potřebné především u vývoje diagnostických systémů, kdy je potřebné porovnávat nové akumulátory s akumulátory v různé fázi životního cyklu.

Jednotlivé metody simulace životního cyklu lze s omezeními aplikovat i v laboratorním prostředí. Pokud se jedná o simulaci životního cyklu akumulátoru v udržovacím režimu, využívá se klimatických komor, ve kterých je možné udržet dlouhodobě vysokou okolní teplotu. Pro cyklování akumulátorů je zapotřebí pouze zátěže na vybití akumulátorů a stejně jako u předchozí metody je zapotřebí nabíjecí zdroj. Kombinovaná metoda pouze spojuje zde popsané metody simulace životního cyklu.

## 2.4 Shrnutí požadavků pro realizaci zadání

Aby bylo možné ověřit metody nabíjení olověných akumulátorů a zároveň měřit jejich provozní parametry a vlastnosti, je nutné zrealizovat testovací modul olověných akumulátorů. Základní funkcí modulu olověných akumulátorů bude nabíječ akumulátorů s nastavitelnými parametry. Dále bude modul implementovat obvody pro měření napětí, proudu a teploty akumulátorů, včetně rozhraní pro výpis dat do měřicího počítače. Parametry modulu olověných akumulátorů budou navrženy tak, aby odpovídaly testovaným olověným akumulátorům firmy Fiamm 12FGL33. Pro možnosti diagnostiky a testování je dále požadavkem implementace spínače externí odporové zátěže pro vybíjení akumulátorů.[2]

Základem modulu olověných akumulátorů je realizace nabíjecího zdroje. S přihlédnutím na laboratorní využití modulu, není nutné konstruovat nabíjecí zdroj tak, aby jej bylo možné napájet přímo z elektrické sítě. Pro vstupní napětí je tedy možné použít laboratorní stejnosměrný zdroj, který musí mít maximální výstupní napětí minimálně 75 V a výstupní proud minimálně 3 A. Pro možnosti nabíjení je požadavkem na zdroj, aby mohlo být výstupní napětí nabíjecího zdroje nastavováno pomocí mikroprocesoru. V případě, kdy jsou nabíjeny 4 olověné akumulátory v sérii, musí být nabíjecí zdroj schopný dodat do akumulátorů proud 3 A při výstupním napětí  $14,4 \cdot 4 = 57,6$  V, které odpovídá plynovací úrovni akumulátorů. Výstupní výkon nabíjecího zdroje musí být při nejvyšší zátěži roven 173 W. Dalším důležitým parametrem je minimální proud zdroje. Z katalogového listu olověných akumulátorů plyne velikost udržovacího proudu, které je pro akumulátory 12FGL33 rovna 10 mA. Požadavkem na nabíjecí zdroj modulu olověných akumulátorů je tedy dále minimální výstupní proud roven 10 mA při výstupním napětí, které odpovídá udržovacímu (float) napětí. Pro okolní teplotu 20 °C se jedná o výstupní napětí  $13,62 \cdot 4 = 54,48$  V.

### 3. Řešení modulu pro testování požadavků zálohovacího systému

Tato kapitola se zabývá popisem modulu olovených akumulátorů, který byl navržen pro možnost ověření navržených metod nabíjení a diagnostiky olovených akumulátorů. Je zde popsána elektronika jednotlivých měřicích obvodů a také návrh regulace pro nabíjecí zdroj. U každé části modulu je také popsán způsob softwarové implementace v mikroprocesoru.

#### 3.1 Koncepce modulu olovených baterií

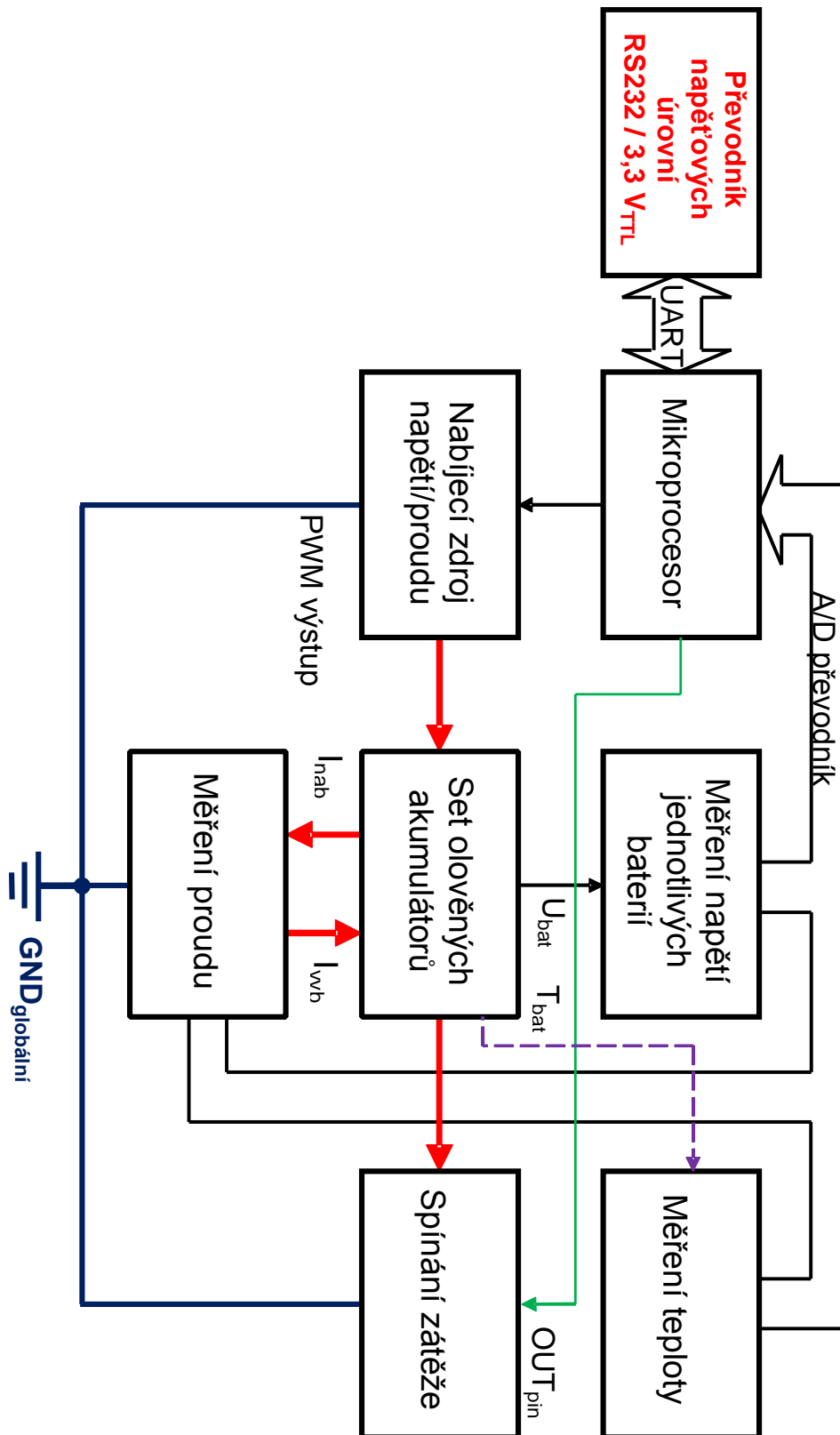
Modul pro olovené akumulátory je koncipován tak, aby s jeho pomocí bylo možné ověřit možnosti realizace požadavků, stanovených v kapitole 2.5. Hlavní částí modulu olovených akumulátorů je nabíjecí zdroj proudu a napětí. Implementace této části je základem pro ověření nabíjecích metod a zároveň pro možnosti cyklování olovených akumulátorů. S návrhem nabíječe akumulátorů je dále spojen návrh obvodů pro měření proudů a napětí. Pomocí těchto obvodů je možné realizovat regulátor proudu a napětí. Zároveň tyto obvody slouží pro měření důležitých hodnot pro diagnostiku akumulátorů. Aby bylo nabíjení, a zároveň veškerá měření na akumulátorech korektní, je nutné zaznamenávat okolní teplotu. Pro tento účel modul olovených akumulátorů obsahuje také obvody na měření teploty. Propojení mezi jednotlivými bloky v modulu olovených akumulátorů je realizováno pomocí mikroprocesoru. Pro možnost vyčítání naměřených dat a případného vzdáleného ovládání modulu, je mikroprocesor připojen ke sběrnici RS-232. Komunikace je řešena pomocí rozhraní UART. Základní parametry modulu olovených akumulátorů jsou shrnuty v tabulce 2, obecné a podrobné blokové schéma je pak součástí kapitoly 3.1.1 jako obr. 23, resp. obr. 24.

<b>Základní parametry modulu olovených akumulátorů</b>	
Maximální výstupní napětí	<b>65 V</b>
Maximální vybíjecí proud	<b>12 A</b>
Maximální nabíjecí proud	<b>4 A</b>
Maximální výstupní výkon	<b>180 W</b>
Rozsah měřených teplot	<b>-40 °C až 80 °C</b>
Rozsah měřeného napětí	<b>9 až 15 V</b>
Rozsah vstupního napětí digitální části	<b>4 až 6,5 V</b>
Rozsah vstupního napětí výkonové části	<b>20 až 100 V</b>

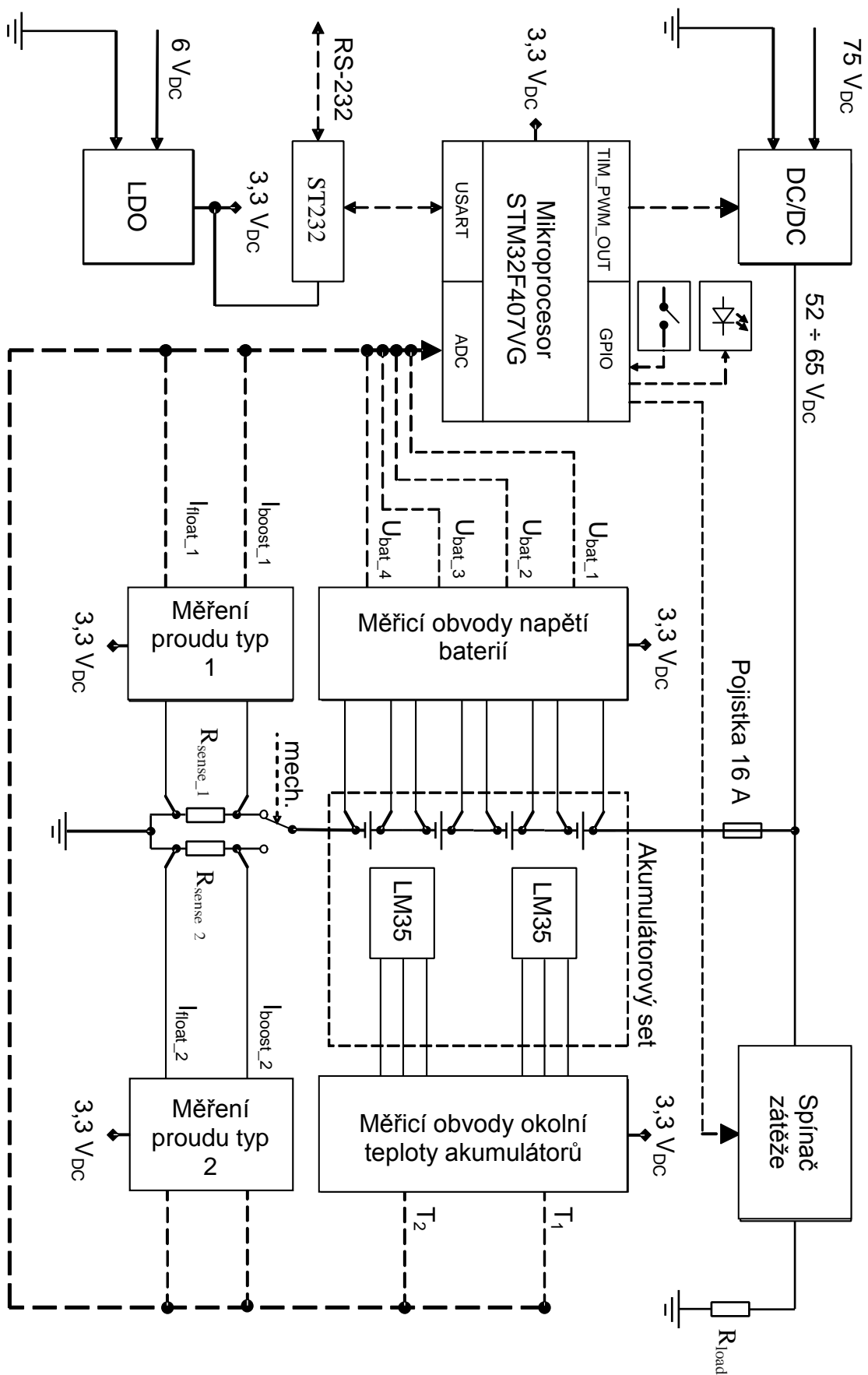
**Tabulka 2 – Souhrn parametrů modulu olovených akumulátorů**



### 3.1.1 Bloková schémata modulu olověných akumulátorů



Obr. 23 – Obecné blokové schéma modulu olověných akumulátorů



Obr. 24 – Podrobné blokové schéma modulu olověných akumulátorů

## 3.2 Návrh obvodu pro měření proudu

### 3.2.1 Návrh a výpočet základního obvodu pro měření proudu

Aby mohl testovací modul olovených akumulátorů korektně nabíjet a zároveň bylo možné měřit potřebné veličiny pro odhad diagnostického systému, musí mít modul implementovány obvody pro měření proudu. V kapitole 2.3.2 je popsáno, jakým způsobem můžeme využít údaje o nabíjecím a vybíjecím proudu pro nabíjení a diagnostiku akumulátorů. Zároveň jsou v této kapitole stanoveny požadavky na měřicí obvody proudu. Jedná se především o měřicí rozsah a rozlišení. Shrnutí požadavků pro měřicí obvody proudu jsou obsaženy v tabulce 3.

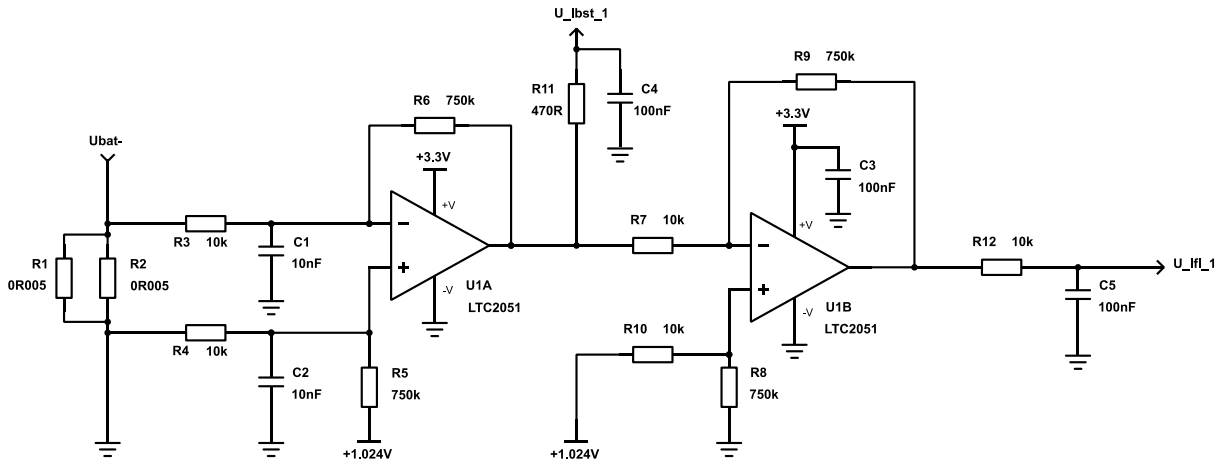
Parametr obvodu měření proudu	Hodnota
Měřicí rozsah pro nabíjení	<b>0 až 4 A</b>
Rozlišení pro nabíjení konstantním proudem	<b>± 30 mA</b>
Rozlišení pro měření udržovacího proudu	<b>± 1 mA</b>
Měřicí rozsah pro vybíjení	<b>0 až 10 A</b>
Rozlišení pro vybíjení	<b>± 50 mA</b>

**Tabulka 3 – Souhrn požadavků pro obvody měření proudu**

Kromě výše zmíněných požadavků pro samotné měření je však důležité dodržet i další podmínky pro realizaci obvodů měření proudu. Základním použitým principem je měření úbytku napětí na snímacím odporu. Tato varianta byla zvolena především pro její jednoduchost a také kvůli úspoře financí. Použití principu bezkontaktního měření pomocí měřících proudových transformátorů, případně pomocí Hallových sond, je díky nutnosti použití speciálních součástek výrazně dražší.

Varianta měření proudu pomocí snímacího rezistoru má však oproti bezkontaktní variantě zásadní nevýhodu, snímací odpor je umístěn přímo v proudové cestě při nabíjení i vybíjení a ovlivňuje tak měřený systém. Jedná se tedy o invazivní princip měření. Z hlediska bezpečnosti použití tohoto principu měření proudu v zálohovacích systémech však narážíme na mnohem závažnější problém. Pokud by došlo k poškození snímacího členu obvodu, tedy snímacího odporu, může dojít k fatálnímu selhání celého zálohovacího systému, neboť dojde k odpojení baterií od proudové cesty. Při použití tohoto principu je tedy nutné použít v proudové cestě co nejméně snímacích odporů, aby se minimalizovala celková pravděpodobnost poškození. Nejčastější příčinou poškození snímacího odporu je překročení maximálního limitu výkonových ztrát. V takovém případě dochází k přehřívání odporu a v extrémním případě může dojít k jeho odletování od plošného spoje, případně k jeho vzplanutí.

V požadavcích je zadáno měření proudu v obou směrech z pohledu akumulátoru. Pro zajištění maximální bezpečnosti systému je v ideálním případě nutné použít jeden snímací odpor pro měření proudu oběma směry. Schéma obvodu pro měření proudu v bezpečnostním zálohovacím systému je zobrazeno na obr. 25.



**Obr. 25 – Schéma obvodu měření proudu s jedním snímacím odporem**

Toto zapojení je koncipováno tak, aby bylo možné snímat proud tekoucí v obou směrech pouze na jednom snímacím rezistoru. Ve vstupních požadavcích je zadán maximální proud tekoucí při vybíjení  $I_{load\_max} = 12\text{ A}$ . Tato hodnota proudu odpovídá maximální velikosti proudu, která protéká snímacím rezistorem, a proto z této hodnoty vycházíme pro výpočet maximálních výkonových ztrát  $P_{Rsh}$  snímacího rezistoru. Maximální povolené výkonové ztráty na snímacím rezistoru byly předem stanoveny na  $P_{Rsh\_max} = 250\text{ mW}$ . Zvolení této hodnoty vychází z klasických řad rezistorů do  $250\text{ mW}$  výkonových ztrát. Cílem je tedy použít takový snímací rezistor, který se nebude přehřívat, případně nebude muset být připojen na chladičové komponenty. V rámci dostupných součástek nejlépe vyhovuje hodnota snímacího rezistoru  $R_{sh} = 5\text{ m}\Omega$ . Výkonové ztráty na tomto rezistoru překračují povolený limit, konkrétně

$$P_{Rsh} = R_{sh} \cdot I_{load\_max}^2 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 12^2 = \underline{720\text{ mW}} \gg P_{Rsh\_max} \quad (3.2.1/1)$$

Řešením tohoto problému je paralelní zapojení dvou rezistorů  $R_{sh}$ . Celkový odpor paralelní kombinace snímacích rezistorů  $R_{sh\_p}$  je roven

$$R_{sh\_p} = R_{sh\_1} || R_{sh\_2} = \frac{R_{sh\_2} \cdot R_{sh\_1}}{R_{sh\_2} + R_{sh\_1}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}} = 2,5\text{ m}\Omega \quad (3.2.1/2)$$

Proud tekoucí jedním rezistorem z paralelní kombinace  $I_{Rsh\_R1}$  je poté roven

$$I_{Rsh\_1} = \frac{U_{Rsh\_p}}{R_{sh\_1}} = \frac{R_{sh\_p} \cdot I_{load\_max}}{R_{sh\_1}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 12}{5 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,03}{5 \cdot 10^{-3}} = 6\text{ A} \quad (3.2.1/3)$$

Výkonová ztráta na snímacím odporu  $R_{sh\_1}$  je tedy rovna

$$P_{Rsh\_1} = R_{sh\_1} \cdot I_{Rsh\_1}^2 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 6^2 = 180\text{ mW} \quad (3.2.1/4)$$

Při použití paralelní kombinace snímacích rezistorů je splněn požadavek na maximální výkonové ztráty rezistoru. Ve schématu obr. 25 se jedná o paralelní zapojení rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ .

Obvod implementuje dvě části. První je navržena pro měření velkých proudů s rozlišením pro nabíjecí a vybíjecí proud, výstup je ve schématu označen  $U_{Ibst\_1}$ . Druhá část je navržena pro měření s rozlišením pro udržovací proud a ve schématu je označena výstupem  $U_{Ifl\_1}$ .

Základní vstupní veličinou pro návrh první části zapojení je měřicí rozsah A/D převodníku, kterým se měří výstup  $U_{Ibst\_1}$ . A/D převodník je implementovaný v mikroprocesoru STM32F407VG, který je napájený 3,3 V. A/D převodník je taktéž napájen 3,3 V a tato hodnota je zároveň jeho maximální vstupní rozsah. Rozlišení je softwarově nastavené na maximální hodnotu 12 bitů. Výstup  $U_{Ibst\_1}$  tedy musí být v maximálním rozsahu 3,3 V. [9]

Měření úbytku napětí na snímacím odporu je implementováno diferenčním zapojením operačního zesilovače. Pro nabíjecí a vybíjecí proud je polarita úbytků napětí na snímacím rezistoru rozdílná. Při klasickém zapojení diferenčního zesilovače by pak dle vztahu (3.2.1/5) dosahovalo výstupní napětí záporných hodnot. [11]

$$U_{dif} = A_{dif} \cdot (U_+ - U_-) = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_+ - U_-) \quad [V] \quad (3.2.1/5)$$

Výstup první části obvodu měření proudu  $U_{Ibst\_1}$  musí dosahovat pouze hodnot v rozsahu 0 až +3,3 V, proto není možné použít symetrické napájení operačního zesilovače  $\pm 3,3$  V. Řešením může být použití dvou diferenčních zesilovačů připojených ke snímacímu rezistoru v opačné polaritě. Toto řešení by však vyžadovalo dvojnásobek měřicích kanálů A/D převodníku a dvojnásobek všech použitých součástek. Výsledkem by byla vysoká prostorová náročnost a také vyšší cena zařízení. Obvod je tedy navržen tak, aby na výstupu  $U_{Ibst\_1}$  byla v rozsahu výstupního napětí 0 až +3,3 V obsažena informace jak o nabíjecím, tak také vybíjecím proudu. Nutnou podmínkou je použití operačního zesilovače s Rail-to-Rail výstupem, tedy se schopností pracovat na výstupu v plném rozsahu napájení zesilovače. [11]

Úbytek napětí při maximálním vybíjecím proudu  $I_{load\_max}$  je roven

$$U_{Rsh\_load\_max} = R_{sh\_p} \cdot I_{load\_max} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot -12 = -30 \text{ mV} \quad (3.2.1/6)$$

Pro maximální nabíjecí proud  $I_{nab\_max}$  je úbytek napětí

$$U_{Rsh\_nab\_max} = R_{sh\_p} \cdot I_{nab\_max} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot +4 = +10 \text{ mV} \quad (3.2.1/7)$$

Celkový rozsah úbytku napětí na snímacím odporu je tedy roven

$$U_{Rsh\_p} = \langle -30, 10 \rangle \text{ mV} \quad (3.2.1/8)$$

Maximální rozdíl je tedy roven 40 mV. Aby bylo zajištěno co nejvyšší možné rozlišení měření, musí být maximální rozdíl úbytků napětí rozložen do vstupního rozsahu A/D převodníku. Zesílení diferenčního zesilovače, s operačním zesilovačem označeným ve schématu jako U1A, musí být v ideálním případě rovno

$$A_{U1A} = \frac{|U_{A/D}|}{|U_{Rsh\_p}|} = \frac{3,3}{0,04} = 82,5 \quad (3.2.1/9)$$

Dle vztahu (3.2.1/9) a zapojení na obr. 25 je zesílení diferenčního zesilovače rovno podílu hodnot zapojených rezistorů, viz vzorec (3.2.1/10), za předpokladu, že rezistor  $R_5$  je totožný s rezistorem  $R_6$ , resp.  $R_4$  musí být totožný s rezistorem  $R_3$ . [11]

$$A_{U1A} = \frac{R_5}{R_4} = \frac{R_6}{R_3} \quad (3.2.1/10)$$

Z dostupných hodnot součástek byly zvoleny následující hodnoty rezistorů

$$R_5 = R_6 = 750 \text{ k}\Omega \quad (3.2.1/11)$$

$$R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega \quad (3.2.1/12)$$

Celkové zesílení diferenčního zesilovače s operačním zesilovačem U1A je rovno

$$A_{U1A} = \frac{R_5}{R_4} = \frac{R_6}{R_3} = \frac{750 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 75 \quad (3.2.1/13)$$

Diferenční zesilovač s výše uvedeným zesílením 75 je tedy schopný měřit úbytek napětí na snímacím odporu v rozsahu

$$A_{U1A} = \frac{|U_{A/D}|}{|U_{Rsh\_p}|} \Rightarrow |U_{Rsh\_p}| = \frac{|U_{A/D}|}{A_{U1A}} = \frac{3,3}{75} = 0,044 \quad (3.2.1/14)$$

Použitím rezistorů pro výsledné nastavení zesílení 75 se dosáhne větší rozsah měřených proudů pro kompletní obvod měření proudu, avšak klesne rozlišení. Aby bylo možné měřit proud tekoucí v obou směrech, tedy kladný i záporný úbytek napětí s diferenčním zesilovačem, který má pouze unipolární napájení, je nutné zapojení diferenčního zesilovače upravit. Pokud by u standardního zapojení s unipolárním napájením bylo připojeno na vstup zesilovače záporné napětí z pohledu kladného vstupu, výstup zesilovače by byl trvale na záporném napájecím potenciálu, tedy u single napájení 0 V. Při použití tohoto zapojení ve schématu obr. 25 by tak nebylo možné měřit nabíjecí proud. [11]

Nejjednodušší úpravou zapojení diferenčního zesilovače pro možnost měření kladného i záporného rozdílu vstupních napětí, je použití umělého offsetu zesilovače. Výstupní napětí diferenčního zesilovače je poté změněno následovně

$$U_{dif} = A_{dif} \cdot (U_+ - U_-) + U_{offset} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_+ - U_-) + U_{offset} \quad [V] \quad (3.2.1/15)$$

Ve vztahu pro výstupní napětí zesilovače (3.2.1/15) lze pozorovat, že použitím umělého offsetu dojde na výstupu k přičtení konstantní hodnoty napětí. Offsetové napětí tedy udává, jaký bude poměr měřených proudů při nabíjení a vybíjení. Z požadavků na měřicí obvod proudu můžeme vypočítat poměr rozsahů nabíjecích proudů a vybíjecích následovně

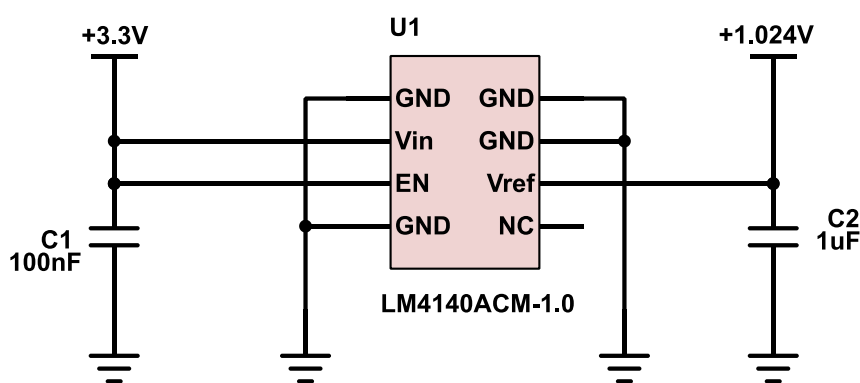
$$p_{nab/load} = \frac{I_{nab\_max}}{I_{load\_max}} = \frac{4}{12} = \frac{1}{3} \quad (3.2.1/16)$$

Pokud tímto poměrem rozdělíme maximální rozsah vstupních napětí měřicího A/D převodníku, dostaneme poměr napětí

$$p_{nab/load} = \frac{I_{nab\_max}}{I_{load\_max}} = \frac{U_{A/D\_nab\_max}}{U_{A/D\_load\_max}} = \frac{3,3 \cdot 1/3}{3,3 \cdot 2/3} = \frac{1,1}{2,2} \left[ \frac{V}{V} \right] \quad (3.2.1/17)$$

Ve schématu (obr. 25) je diferenční zesilovač zapojený tak, aby měřil kladný úbytek napětí snímacího rezistoru při vybíjecím proudu. Záporný rozdíl vstupních napětí zesilovače tedy nastává při nabíjecím proudu a pro jeho rozsah je nutné použít offsetové napětí na výstupu zesilovače.

Pro vypočtený poměr maximálního nabíjecího a vybíjecího proudu a poměr výstupního napětí zesilovače, můžeme určit umělé offsetové napětí pro diferenční zesilovač jako  $U_{offset} = 1,1 \text{ V}$ . Z dostupných součástek byla použita precizní napěťová reference LM4140ACM-1.0 s výstupním napětím 1,024 V a přesností 0,1 %, zapojená dle obr. 26.



**Obr. 26 – Schéma zapojení obvodu s precizní napěťovou referencí LM4140ACM-1.0**

Při použití offsetového napětí  $U_{offset} = 1,024 \text{ V}$  dojde ke změně poměru výstupního napětí diferenčního zesilovače pro nabíjecí proudy a vybíjecí proudy. Pro maximální měřitelný nabíjecí proud poté platí

$$U_{Rsh\_nab\_max} = \frac{U_{offset}}{A_{U1A}} = \frac{1,024}{75} \cong 0,01365 \text{ V} \quad (3.2.1/18)$$

$$I_{nab\_max} = \frac{U_{Rsh\_nab\_max}}{R_{sh\_p}} = \frac{0,01365}{0,0025} = 5,46 \text{ A} \quad (3.2.1/19)$$

Pro maximální vybíjecí proud platí analogicky

$$U_{Rsh\_load\_max} = \frac{U_{cc} - U_{offset}}{A_{U1A}} = \frac{3,3 - 1,024}{75} \cong 0,03037 \text{ V} \quad (3.2.1/20)$$

$$I_{load\_max} = \frac{U_{Rsh\_load\_max}}{R_{sh\_p}} = \frac{0,03037}{0,0025} = 12,148 \text{ A} \quad (3.2.1/21)$$

Měřicí A/D převodník má rozlišení 12 bitů a vstupní napěťový rozsah má hodnotu 0 až 3,3 V. Měřitelné rozlišení nabíjecích a vybíjecích proudů při zanedbání rušení je následující

$$U_{A/D\_12bit} = 3,3 \text{ V} \Rightarrow A/D = 0xFFF = 4095 \quad (3.2.1/22)$$

Jeden krok A/D převodníku odpovídá napětí

$$A/D = 0x001 = 1 \Rightarrow U_{A/D} = \frac{U_{cc}}{A/D_{max}} = \frac{3,3}{4096} \cong 0,8057 \text{ mV} \quad (3.2.1/23)$$

Změna o jeden dílek A/D převodníku odpovídá změně napětí na vstupu

$$U_{Rsh} = \frac{U_{A/D}}{A_{U1A}} = \frac{0,8057 \cdot 10^{-3}}{75} \cong 10,743 \text{ } \mu\text{V} \quad (3.2.1/24)$$

Změna jednoho dílku v A/D převodníku je pak rovna změně proudu

$$I_{Rsh} = \frac{U_{Rsh}}{R_{sh}} = \frac{10,743 \cdot 10^{-6}}{0,0025} \cong 4,297 \text{ mA} \quad (3.2.1/25)$$

Toto rozlišení s rezervou postačuje na splnění požadavků pro měření velkých nabíjecích a vybíjecích proudů. Pro měření udržovacích proudů však toto rozlišení nepostačuje. Tento problém řeší druhá část schématu. Stejně jako první část, je i tato řešená pomocí diferenčního zesilovače s operačním zesilovačem U1B. Základním principem je zesílení rozsahu výstupního napětí prvního diferenčního zesilovače pro udržovací proud tak, aby bylo výstupní napětí druhého diferenčního zesilovače  $U_{Ifl\_1}$  na úrovni maximálního vstupního rozsahu A/D převodníku. Rozsah měření udržovacího proudu byl stanoven na  $I_{float} = 200 \text{ mA}$ . Pro maximální udržovací proud je výstup prvního diferenčního zesilovače  $U_{Ibst\_1}$  roven

$$U_{Ibst\_1} = -U_{Rsh} \cdot A_{U1A} + U_{offset} = -I_{Rsh} \cdot R_{sh} \cdot A_{U1A} + U_{offset} = 0,9865 \text{ V} \quad (3.2.1/26)$$

Rozsah výstupního napětí  $U_{Ibst\_1}$  pro udržovací proud 0 až 200 mA je roven

$$U_{bst\_float} = \langle 0,9865; 1,024 \rangle \text{ V} \Rightarrow |U_{bst\_float}| = 0,0375 \text{ V} \quad (3.2.1/27)$$

Vstupní rozsah druhého diferenčního zesilovače je 0,0375 V. Aby byl tento rozsah na výstupu druhého zesilovače odpovídal maximálnímu vstupnímu napětí A/D převodníku, musí mít zesilovač zesílení

$$A_{U1B} = \frac{|U_{A/D}|}{|U_{bst\_float}|} = \frac{3,3}{0,0375} = 88 \quad (3.2.1/28)$$

Z dostupných hodnot součástek byly zvoleny následující hodnoty rezistorů

$$R_8 = R_9 = 750 \text{ k}\Omega \quad (3.2.1/29)$$

$$R_7 = R_{10} = 10 \text{ k}\Omega \quad (3.2.1/30)$$

S těmito hodnotami odporů je zesílení zesilovače  $A_{U1B} = 75$ . Rozlišení měření udržovacího proudu je vypočteno stejně jako pro nabíjecí a vybíjecí proudy. Jeden dílek A/D převodníku připojeného na vstup  $U_{Ifl\_1}$  tedy odpovídá proudu při zanedbání šumu



$$I_{float\_1} = \frac{U_{Rsh}}{R_{sh}} = \frac{U_{Ibst\_1}}{R_{sh}} = \frac{U_{Ifl\_1}}{R_{sh}} = \frac{\frac{U_{cc}}{A/D_{max}}}{R_{sh}} = \frac{\frac{3,3}{4096}}{\frac{75}{75}} = \frac{143 \text{ nV}}{0,0025 \Omega} \cong 57,291 \mu A \quad (3.2.1/31)$$

Měřený rozsah udržovacího proudu je roven

$$|I_{float}| = I_{float\_1} \cdot A/D_{max} \cong 234,7 \text{ mA} \quad (3.2.1/32)$$

Toto rozlišení splňuje předem stanovenou hodnotu rozlišení pro udržovací proud. Realizace zapojení druhého diferenčního zesilovače je shodná jako u prvního diferenčního zesilovače. Výstupní napětí prvního zesilovače je vždy kladné a pro rozsah udržovacího proudu 234,7 mA je výstupní napětí prvního zesilovače v rozmezí  $U_{Ibst\_1} = \langle 1,024; 0,9865 \rangle V$ .

Aby byl výstup druhého diferenčního zesilovače  $U_{Ifl\_1}$  rovný 0 V při nulovém proudu, je zapojen tak, aby splňoval následující vztah pro výstupní napětí

$$U_{Ifl\_1} = A_{U1B} \cdot (U_{ref} - U_-) = 75 \cdot (1,024 - U_-) \text{ [V]} \quad (3.2.1/33)$$

Referenční napětí  $U_{ref}$  je také použité z precizní napěťové reference LM4140ACM-1.0. Při nulovém proudu je výstupní napětí prvního zesilovače rovné  $U_{offset}$ . Díky použité stejné referenci pro  $U_{ref}$  a  $U_{offset}$  je při nulovém proudu výstup z druhého zesilovače roven 0 V, na rozdíl od chybového napětí, které by mohlo být způsobeno nepřesností dvou různých napěťových referencí.

Použitým operačním zesilovačem je dvojité precizní LTC2051. Keramický kondenzátor  $C_3$  slouží pro blokování napájení operačního zesilovače. Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  slouží spolu s rezistory  $R_3$  a  $R_4$  jako odrušovací dolnoproustný RC filtr. Mezi výstupy diferenčních zesilovačů  $U_{Ibst\_1}$  a  $U_{Ifl\_1}$  a jejich měřicími kanály A/D převodníku jsou zapojeny dolnoproustné RC filtry, které jsou tvořeny rezistory  $R_{11}$  a  $R_{12}$  a kondenzátory  $C_4$  a  $C_5$ . Mezní frekvence těchto filtrů je  $f_m \approx 21277 \text{ Hz}$ .

### 3.2.2 Výpočet výstupního šumu hlavního obvodu měření proudu

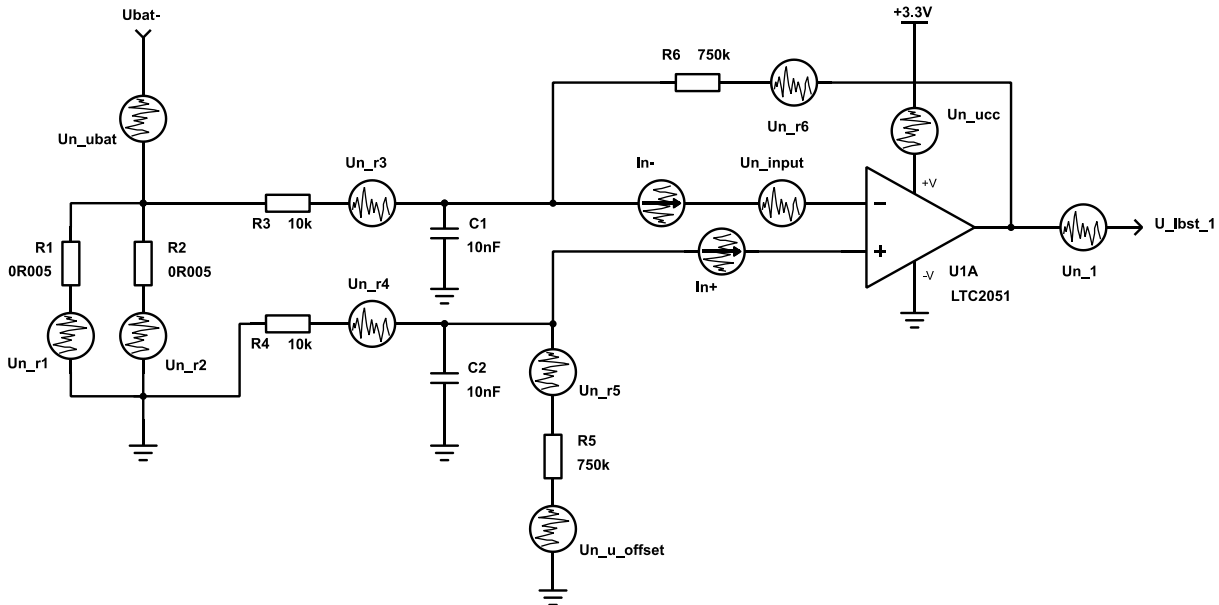
Obvod pro měření proudu popsáný v kapitole 3.2.1 má vlastnosti vhodné pro bezpečné měření proudu v zálohovacích systémech. Bohužel díky ústupkům pro celkovou bezpečnost, jako je například jeden použitý snímací rezistor, obsahuje toto zapojení řadu nevýhod, které jsou způsobeny vlastnostmi reálných součástek v zapojení. Především se jedná o vlastní šum operačního zesilovače a použitých rezistorů. Dále měření ovlivňují i jiné vlastnosti reálných zesilovačů, jako je například offset a jeho teplotní drift. Aby se dalo ještě před reálným ověřením zapojení odhadnout, jak se reálné vlastnosti součástek projeví na výsledném rozlišení měření, byla provedena šumová analýza obvodu, dle popisu v dokumentu [32].

Nejprve je nutné vypočítat výstupní napěťový šum prvního zesilovače, tedy napěťový šum na výstupu  $U_{Ibst\_1}$ , při zanedbání výstupního RC filtru. Prvním krokem je nákres šumového modelu, viz obr. 27.. Šumový model je ve zjednodušeném pohledu kompletní elektronické schéma zapojení, ve kterém jsou zakreslené zdroje napěťového a proudového šumu. Základním zdrojem šumu, který je součástí každého elektronického zapojení, je tzv.

Johnsonův teplotní šum. Tento šum je při šumové analýze nutné uvažovat u každého rezistoru. Johnsonův šum je definován následovně [32]

$$U_{n_{Johnson}} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot B} \quad (3.2.2/1)$$

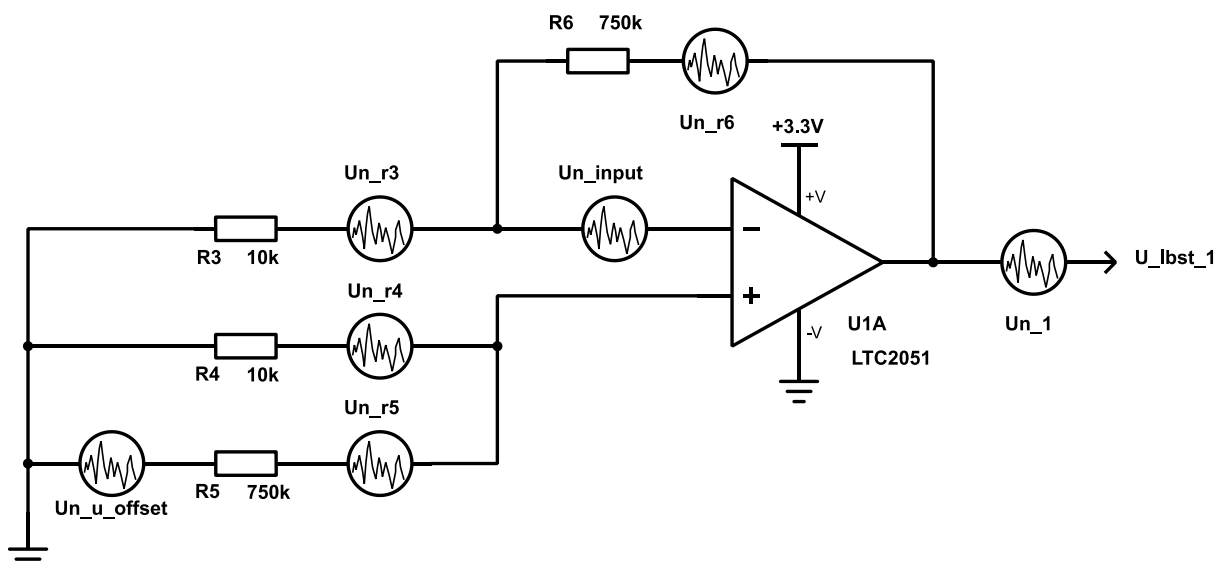
Kde  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $T$  je teplota rezistoru v kelvinech,  $R$  je odpor rezistoru a  $B$  je frekvenční šířka pásma, ve kterém byl šum změřen. [32]



**Obr. 27 – Šumový model obvodu měření vybíjecího a nabíjecího proudu**

Ze vztahu je patrné, že šum rezistorů je tím větší, čím větší je okolní teplota a čím větší je odpor rezistoru. Dalším typem šumů, které jsou obsaženy v šumovém modelu obr. 27., je šum napájecího zdroje, napěťové reference a samotného měřeného zdroje napětí. Tyto šумы jsou tvořené stejným způsobem, jako vlastní šумы operačního zesilovače LTC2051, které jsou zásadní pro výpočet šumového modelu. Pro operační zesilovače se nejčastěji udávají hodnoty vstupního napěťového a proudového šumu.

Výše popsáný šumový model obr. 27., obsahuje téměř všechny zdroje šumu, které se v obvodu uplatňují. Pro finální výpočet však postačuje zjednodušený model, neboť většina zdrojů šumu se na výstupu obvodu projeví jen minimálně, nebo nejsou některé hodnoty šumu k dispozici. Dále je výhodné upravit zapojení tak, aby byl finální výpočet co nejjednodušší. Zjednodušený šumový model je zobrazen na obr. 28.



**Obr. 28. – Zjednodušený šumový model obvodu měření vybíjecího a nabíjecího proudu**

Základní změnou u zjednodušeného modelu je odstranění snímacích rezistorů a jejich zdrojů šumu. Díky celkovému odporu paralelní kombinace snímacích rezistorů je možné rezistory považovat za zkrat. Zároveň díky jejich malé velikosti odporu můžeme zanedbat jejich šum, neboť se na výstupu téměř neuplatní. Díky těmto úpravám můžeme považovat rezistory  $R_4$  a  $R_5$  jako paralelní kombinaci. Další úpravou je odstranění vstupních proudových zdrojů šumu do operačního zesilovače. Tyto hodnoty nejsou výrobcem operačního zesilovače LTC2051 uvedeny. Zanedbány byly také šумы napěťových zdrojů, kde tyto hodnoty nejsou známy. Zůstal pouze výstupní napěťový šum reference LM4140ACM-1.0, který je uveden v katalogovém listu. Dále byly zanedbány kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$ , které se do šumového modelu neprojeví. Napěťový zdroj šumu  $U_{n_1}$  na výstupu obvodu je celkový výstupní šum obvodu.

V prvním kroku je nejprve nutné vypočítat šумы jednotlivých rezistorů, jedná se o zdroje šumu  $U_{n_r3}$ ,  $U_{n_r4}$  a  $U_{n_r5}$ ,  $U_{n_r6}$ . Pro výpočet šumu rezistorů je použit vzorec (3.2.2/1) pro výpočet Johnsonova teplotního šumu. Jak již bylo zmíněno, testovací modul olověných akumulátorů je navržen pro práci v okolní teplotě  $T_{amb} = 25\text{ °C} = 298,15\text{ K}$ . Boltzmanova konstanta je rovna  $k \approx 1,39 \times 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ . Odpor rezistorů je dán a šířka pásma je nutné definovat empiricky. Běžně se udává šířka pásma v rozmezí  $B = \langle 0,1; 110 \rangle\text{ Hz}$ , proto je zvolena také pro tento výpočet. Jednotlivé efektivní hodnoty šumů rezistorů jsou následující

$$U_{n_r3} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T_{amb} \cdot R \cdot B} = \sqrt{4 \cdot 1,39 \cdot 10^{-23} \cdot 298,15 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot (110 - 0,1)}\text{ V} \quad (3.2.2/2)$$

$$U_{n_r3}, U_{n_r4} \cong 135\text{ nV}_{rms} \quad (3.2.2/3)$$

$$U_{n_r5}, U_{n_r6} \cong 1,169\text{ }\mu\text{V}_{rms} \quad (3.2.2/4)$$

Dalším krokem je definování vstupního napěťového šumu operačního zesilovače a také výstupního napěťového šumu napěťové reference. Tyto hodnoty jsou definovány následovně

$$U_{n_{input}} = 1,5\text{ }\mu\text{V}_{p-p} \quad (3.2.2/5)$$

$$U_{n\_u\_offset} = 2,2 \mu V_{p-p} \quad (3.2.2/6)$$

Pro výpočet celkového výstupního šumového napětí jsou potřebné efektivní hodnoty šumu. Výše zadané hodnoty jsou hodnoty šumového napětí špička-špička. Je tedy potřebné tyto hodnoty převést. V dokumentu [32] je doporučený postup pro převedení hodnoty špička-špička na efektivní pomocí vydělení konstantou 6. Výsledek je tedy

$$U_{n\_input\_rms} = \frac{U_{n\_input\_p-p}}{6} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{6} \cong 0,25 \mu V_{rms} \quad (3.2.2/7)$$

$$U_{n\_u\_offset\_rms} = \frac{U_{n\_u\_offset\_p-p}}{6} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{6} \cong 0,367 \mu V_{rms} \quad (3.2.2/8)$$

Dalším krokem je zjednodušení schématu pomocí výpočtu paralelních kombinací rezistorů v zapojení. Dle [32] můžeme považovat rezistory  $R_6$  a  $R_3$  díky uzemněnému vstupu obvodu jako paralelní kombinaci. Jednoduše tak můžeme vypočítat odpory těchto paralelních kombinací, ze kterých můžeme následně vypočítat jednotlivé tepelné šумы paralelních kombinací. Výsledky jsou následovné

$$U_{n\_r3||r6} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T_{amb} \cdot R_3 || R_6 \cdot B} \quad (3.2.2/9)$$

$$U_{n\_r3||r6} = \sqrt{4 \cdot 1,39 \cdot 10^{-23} \cdot 298,15 \cdot (10 \cdot 10^3) || (750 \cdot 10^3) \cdot (110 - 0,1)} \cong 134 \text{ nV}_{rms} \quad (3.2.2/10)$$

$$U_{n\_r4||r5} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T_{amb} \cdot R_4 || R_5 \cdot B} \quad (3.2.2/11)$$

$$U_{n\_r4||r5} = \sqrt{4 \cdot 1,39 \cdot 10^{-23} \cdot 298,15 \cdot (10 \cdot 10^3) || (750 \cdot 10^3) \cdot (110 - 0,1)} \cong 134 \text{ nV}_{rms} \quad (3.2.2/12)$$

Šum paralelní kombinace rezistorů  $R_4$  a  $R_5$  není složen pouze z Johnsonova teplotního šumu  $U_{n\_r4||r5}$ , ale také z šumu napěťové reference  $U_{n\_u\_offset}$ . Celkový šum, který se uplatňuje na rezistoru  $R_4 || R_5$ , je dle [32] roven součtu druhých mocnin jednotlivých hodnot šumů pod odmocninou, tedy střednímu kvadratickému průměru. Výsledný šum rezistoru  $R_4 || R_5$  je roven

$$U_{n\_r4||r5\_celk} = \sqrt{(U_{n\_r4||r5})^2 + (U_{n\_u\_offset\_rms})^2} = \sqrt{(134 \cdot 10^{-9})^2 + (0,367 \cdot 10^{-6})^2} \quad (3.2.2/13)$$

$$U_{n\_r4||r5\_celk} \cong 391 \text{ nV}_{rms} \quad (3.2.2/14)$$

Celkový vstupní šum obvodu je roven taktéž jako v předchozím kroku střednímu kvadratickému průměru, avšak tentokrát všech zdrojů šumu. Celkový vstupní šum obvodu je tedy roven

$$U_{n\_1\_in} = \sqrt{(U_{n\_r4||r5\_celk})^2 + (U_{n\_r3||r6})^2 + (U_{n\_input\_rms})^2} \quad (3.2.2/15)$$

$$U_{n\_1\_in} = \sqrt{(391 \cdot 10^{-9})^2 + (134 \cdot 10^{-9})^2 + (0,25 \cdot 10^{-6})^2} \cong 483 \text{ nV}_{rms} \quad (3.2.2/16)$$

Celkový výstupní šum je poté roven vstupnímu šumu vynásobenému zesílení zesilovače.

$$U_{n_1} = U_{n_1,in} \cdot A_{U1A} = 483 \cdot 10^{-9} \cdot 75 \cong \underline{36,225 \mu V_{rms}} \quad (3.2.2/17)$$

Stejným postupem se vypočte celkový výstupní šum druhého rozdílového zesilovače, kde se do celkového výpočtu zjednodušeného šumového modelu přidá jako vstupní šum celkový výstupní šum prvního zesilovače. Výsledný vstupní šum druhého zesilovače je tedy roven

$$U_{n_2,in} = \sqrt{(U_{n_1})^2 + (U_{n_r8||r10_{celk}})^2 + (U_{n_r7||r9})^2 + (U_{n_{input\_rms}})^2} \quad (3.2.2/18)$$

$$U_{n_2,in} = \sqrt{(36,225 \cdot 10^{-6})^2 + (134 \cdot 10^{-9})^2 + (391 \cdot 10^{-9})^2 + (0,25 \cdot 10^{-6})^2} \quad (3.2.2/19)$$

$$U_{n_2,in} = 501,311 \mu V_{rms} \quad (3.2.2/20)$$

Pro výpočet výstupního napětového šumu je nutné vynásobit vstupní napětový šum zesílením druhého rozdílového zesilovače. Celkový výstupní napětový šum obvodu pro měření udržovacího proudu je roven

$$U_{n_2} = U_{n_2,in} \cdot A_{U2A} = 501,311 \cdot 10^{-6} \cdot 75 \cong \underline{37,598 mV_{rms}} \quad (3.2.2/21)$$

Celková mezišpičková hodnota výstupního napětí je poté rovna

$$U_{n_2,p-p} = U_{n_2} \cdot 6 = 37,598 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cong \underline{225,588 mV_{p-p}} \quad (3.2.2/22)$$

Kromě výše popsané šumové analýzy se na výstupní hodnotě napětí zesilovače projeví také napětový offset a jeho teplotní drift. V tuto chvíli není modul olověných akumulátorů navržen pro jinou okolní teplotu, než je pokojová, tedy přibližně 25 °C. Offsetový drift je tedy možné zanedbat, avšak při návrhu zapojení pro široký rozsah okolních teplot je tento parametr nezanedbatelný. Použitý operační zesilovač LTC2051 patří do skupiny precizních operačních zesilovačů, které se vyznačují téměř nulovým offsetem a jeho driftem. Konkrétní typické (maximální) hodnoty jsou následující [33]

- Vstupní napětový offset =  $\pm 0,5 \mu V$  ( $\pm 3 \mu V$ )
- Průměrný vstupní napětový drift =  $\pm 0,01 \mu V/^{\circ}C$  ( $\pm 0,03 \mu V/^{\circ}C$ )

Pokud porovnáme spočítané výstupní hodnoty šumů s vypočtenými rozlišeními výstupů pro nabíjecí a vybíjecí proudy a pro udržovací proudy, můžeme usoudit, že pro velké nabíjecí, či vybíjecí proudy výstupní napětový šum neovlivní navržené rozlišení. Pro nabíjecí proudy je však zhoršení významné. Tento nedostatek je řešen pomocí softwarového průměrování, neboť udržovací proud je pouze statistický údaj, který neslouží pro regulaci. Druhým řešením je použití jiného typu zapojení, které je taktéž implementováno na modulu olověných akumulátorů pro možnost porovnání metodou popsanou v této kapitole.

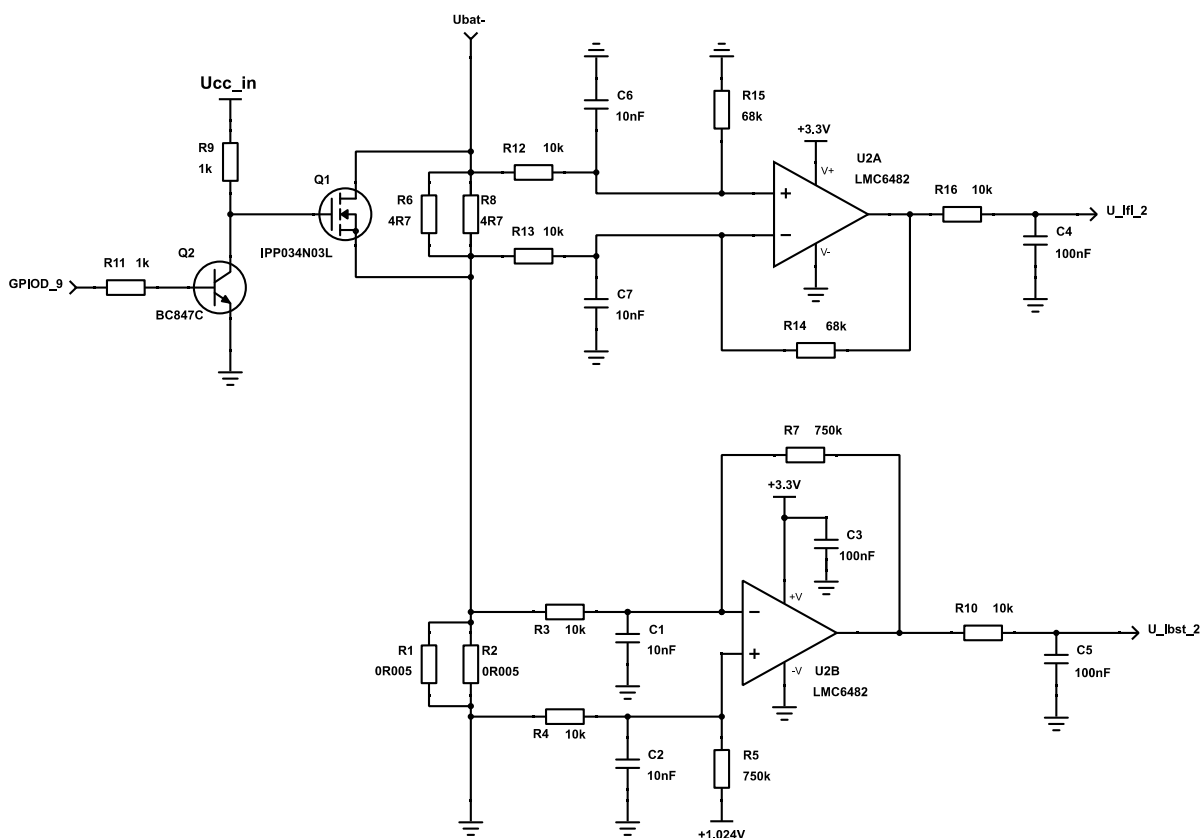
### 3.2.3 Návrh a výpočet alternativního obvodu měření proudu

Jak již bylo na konci předchozí kapitoly zmíněno, na modulu olověných akumulátorů je implementován také druhý obvod pro měření proudu, obr. 29. Toto zapojení je koncipováno tak, aby bylo možné přesně měřit udržovací proud s rozlišením  $\pm 1 \mu A$ , při minimálním šumu na výstupu. Tento obvod již nesplňuje bezpečnostní požadavky do takové míry, jako obvod předchozí. Zároveň vyžaduje externí řízení mikroprocesorem.

Základem tohoto obvodu je měření nabíjecího a vybíjecího proudu, které je totožné s prvním obvodem, pouze byl zvolen odlišný operační zesilovač, konkrétně LMC6482. Tento operační zesilovač má horší vlastnosti, než předchozí LTC2051. Je však levnější, což je spojeno s první výhodou tohoto zapojení, jímž je celková cena. Oproti prvnímu obvodu, ve kterém byl použit precizní operační zesilovač, je tento obvod navzdory vyššímu počtu součástek levnější.

Odlišnou částí oproti prvnímu obvodu měření proudu je část měření udržovacího proudu. V tomto principu jsou použity dva odlišné snímací prvky. Jeden pro měření velkých nabíjecích a vybíjecích proudů, druhý slouží pro měření proudů udržovacích. Jak již bylo v požadavcích stanoveno, udržovací proud je potřeba měřit od 0 do 200 mA. Při těchto proudech je možné použít mnohem větší hodnoty snímacích rezistorů, neboť jejich výkonové ztráty budou při tomto rozmezí proudu výrazně menší, a zároveň bude vznikat větší úbytek napětí, který nebude nutné výrazně zesilovat pro dosažení maximálního vstupního rozsahu A/D převodníku.

Nelze však použít pouze prosté zapojení dvou snímacích rezistorů v sérii. Především při velkých vybíjecích proudech by docházelo k velkým výkonovým ztrátám na snímacích rezistorech udržovacího proudu a s největší pravděpodobností by došlo k jejich zničení, případně až odletování z plošného spoje.



**Obr. 29 – Návrh alternativního obvodu měření proudu**

Tento nedostatek je především v bezpečnostních zálohovacích systémech absolutně nežádoucí a způsobil by fatální selhání systému zálohování. Jako řešení je v tomto obvodu použit paralelně zapojený MOS tranzistor ke snímacím odporům, který má velice nízký parametr  $R_{ds,on}$ , tedy odpor v sepnutém stavu. Jeho funkcí je odklonit velké proudy od snímacích

odporů a tím zabránit jejich poškození díky velkému ztrátovému výkonu, který je však MOS tranzistor schopen díky připojenému chladiči uchládit.

Část obvodu pro měření velkých proudů je totožná s prvním obvodem měření proudu, pouze je použit operační zesilovač LMC6482, který má horší parametry, než u prvního obvodu použitý LTC2051. Především se jedná o vstupní napěťový šum, který má hodnotu  $2,379 \mu V_{p-p}$ . Celkový výstupní šum je vypočten podle stejného postupu

$$U_{n\_ibst2\_in} = \sqrt{(U_{n\_r4||r5\_celk})^2 + (U_{n\_r3||r7})^2 + (U_{n\_input\_rms})^2} \quad (3.2.3/1)$$

$$U_{n\_ibst2\_in} = \sqrt{(391 \cdot 10^{-9})^2 + (134 \cdot 10^{-9})^2 + ((2,379 \cdot 10^{-6})/6)^2} \cong 573 \text{ nV}_{rms} \quad (3.2.3/2)$$

$$U_{n\_ibst2} = U_{n\_ibst2\_in} \cdot A_{U2A} = 573 \cdot 10^{-9} \cdot 75 \cong \underline{42,975 \mu V_{rms}} = \underline{257,85 \mu V_{p-p}} \quad (3.2.3/3)$$

Výstupní rozlišení obvodu měření nabíjecích a vybíjecích proudů tedy není výrazně ovlivněno použitím méně kvalitního operačního zesilovače.

Pro obvod měření udržovacího proudu jsou taktéž použity stejné vztahy pro výpočet výkonových ztrát snímacích rezistorů a celkového zesílení zesilovače. Pro zesílení na plný vstupní rozsah měřicího A/D převodníku je použito zesílení  $A_{U2A} = 6,8$ . Pro toto zesílení je rozsah měřených proudů roven  $I_{float} = 206,508 \text{ mA}$ . Celkové rozlišení měření udržovacího proudu je poté rovno  $I_{float\_1} \approx 50,417 \mu A$ .

Jako přemostňující prvek byl použit MOSFET tranzistor IPP034N03L s nízkým odporem v sepnutém stavu, tedy parametrem  $R_{ds\_on}$ . Pro sepnutí MOSFET tranzistoru, označeného ve schématu obr. 29 jako  $Q_1$ , je nutné připojit mezi piny Gate a Source kladné napětí. Na tomto napětí je zároveň závislý parametr  $R_{ds\_on}$ . Z katalogového listu tranzistoru je možné odečíst, že pro napětí  $U_{gs}$  větší než 5 V nedochází k výrazné změně parametru  $R_{ds\_on}$  v širokém rozsahu proudů tranzistoru, jejíž hodnota je rovna  $R_{ds\_on} = 3,75 \text{ m}\Omega$ . Při průtoku maximálního vybíjecího proudu 12 A je ztrátový výkon na tranzistoru  $Q_1$  roven

$$P_{Q1} = I_{load\_max}^2 \cdot R_{ds\_on} \cong 0,54 \text{ W} \quad (3.2.3/4)$$

Maximální výstupní napětí z mikroprocesoru je 3,3 V, a proto je nutné použít pomocný spínací obvod s bipolárním tranzistorem BC847C, označeným ve schématu jako  $Q_2$ . Jako hlavní spínací napětí tranzistoru  $Q_1$ , ve schématu  $U_{cc\_in}$ , je použito vstupní napětí lineárního regulátoru, který zajišťuje hlavní napájecí napětí modulu  $U_{cc} = 3,3 \text{ V}$ . Spínání tranzistoru poté obsluhuje mikroprocesor, který dokáže rozlišit mezi jednotlivými režimy měření pomocí druhé části obvodu měření proudu.

### 3.3 Návrh obvodu pro měření napětí

Stejně jako měření proudu je velice důležité měřit napětí na jednotlivých akumulátorech. Testovací modul olověných akumulátorů má tak přehled o stavu jednotlivých akumulátorů v akumulátorovém setu a je tak schopný odhadnout, kdy má určitý akumulátor ze setu příznaky snížené celkové životnosti. V kapitole 2.3.2 jsou stanoveny základní požadavky na měření napětí a je zde popsáno, jakým způsobem lze využít údaje o napětí využít pro

diagnostiku akumulátorů. Shrnutí požadavků pro měřicí obvody proudu jsou obsaženy v tabulce 4.

Parametr obvodu měření napětí	Hodnota
Měřicí rozsah napětí	<b>9 až 15 V</b>
Rozlišení pro měřené napětí	<b>± 15 mV</b>
Maximální počet měřených akumulátorů	<b>4</b>
Maximální rozsah výstupního napětí obvodu	<b>0 až 3,3 V</b>

**Tabulka 4 – Souhrn požadavků pro obvody měření napětí**

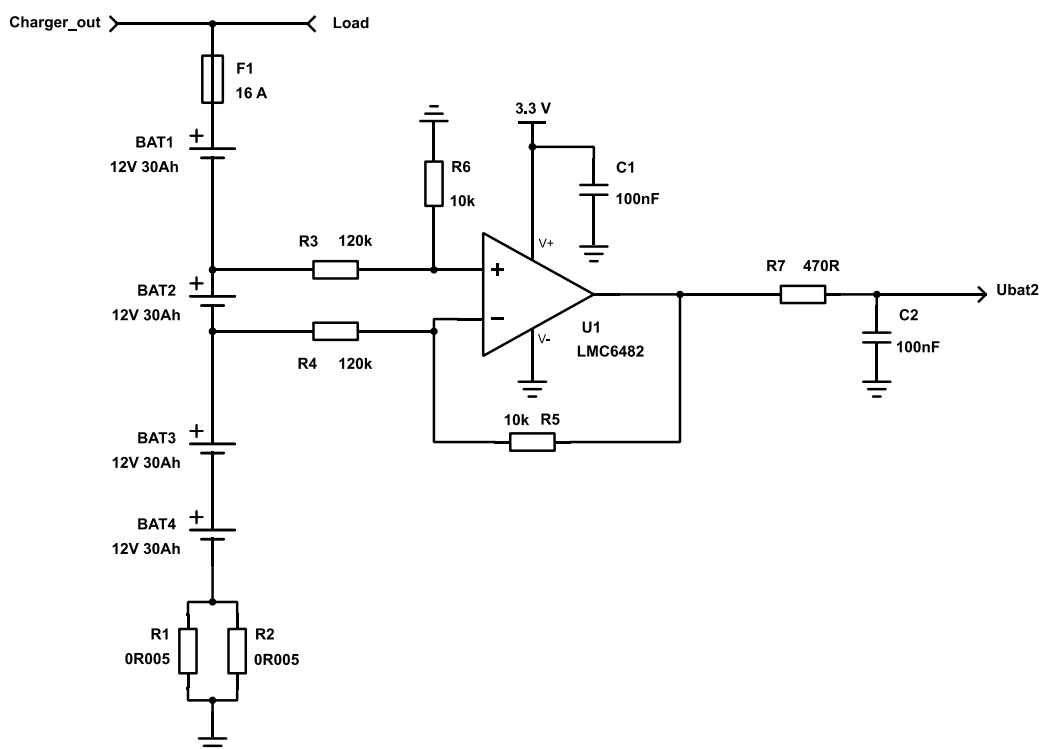
Při návrhu měření napětí na jednotlivých akumulátorech bylo základním požadavkem měřit takovým způsobem, aby nedocházelo k výraznému zatěžování měřených akumulátorů. Dalším důležitým požadavkem je navržení měřicího obvodu napětí olověných akumulátorů tak, aby bylo rozlišení měření na každém akumulátorů stejné.

Pro výše zmíněné požadavky byl obvod nejprve navržen pomocí rozdílových zesilovačů s operačními zesilovači, popsány v kapitole měření proudu 3.2, viz obr. 30. U tohoto typu obvodu se dle vzorce (3.2.1/5) tedy nejedná o rozdílový zesilovač, nýbrž zeslabovač. Je tak dáno díky maximálnímu vstupnímu napětí A/D převodníku  $U_{A/D\_max} = 3,3 \text{ V}$ . Tento obvod splňuje požadavky na vstupní rozsah měření a díky vysokým hodnotám odporu vstupních rezistorů prakticky nezatěžuje měřené akumulátory. Výhodou je také možnost použití čtyř operačních zesilovačů v jednom pouzdře. Zásadní problém, kvůli kterému bylo toto řešení odloženo, je se vstupním měřeným napětím na rozdílových zesilovačích. Díky zapojení akumulátorů v sérii jsou vstupní napětí zesilovače tím větší, čím výše v akumulátorovém setu je akumulátor zapojen. Hodnoty rezistorů v zapojení tedy musí být navrženy tak, aby vstupní napětí operačních zesilovačů bylo v povoleném pásmu. Maximální vstupní napětí použitého operačního zesilovače LMC6482 je rovno

$$U_{OZ\_in\_max} = U_+ + 0,3 = 3,3 + 0,3 = 3,6 \text{ V} \quad (3.3/1)$$

Tento vstupní rozsah napětí je nutné vždy dodržet a je tedy nutné napočítat pro každou baterii jiné hodnoty rezistorů. S tím je poté spojeno jiné zesílení zesilovačů, čímž se změní u každého zesilovače výstupní rozsah a také rozlišení.

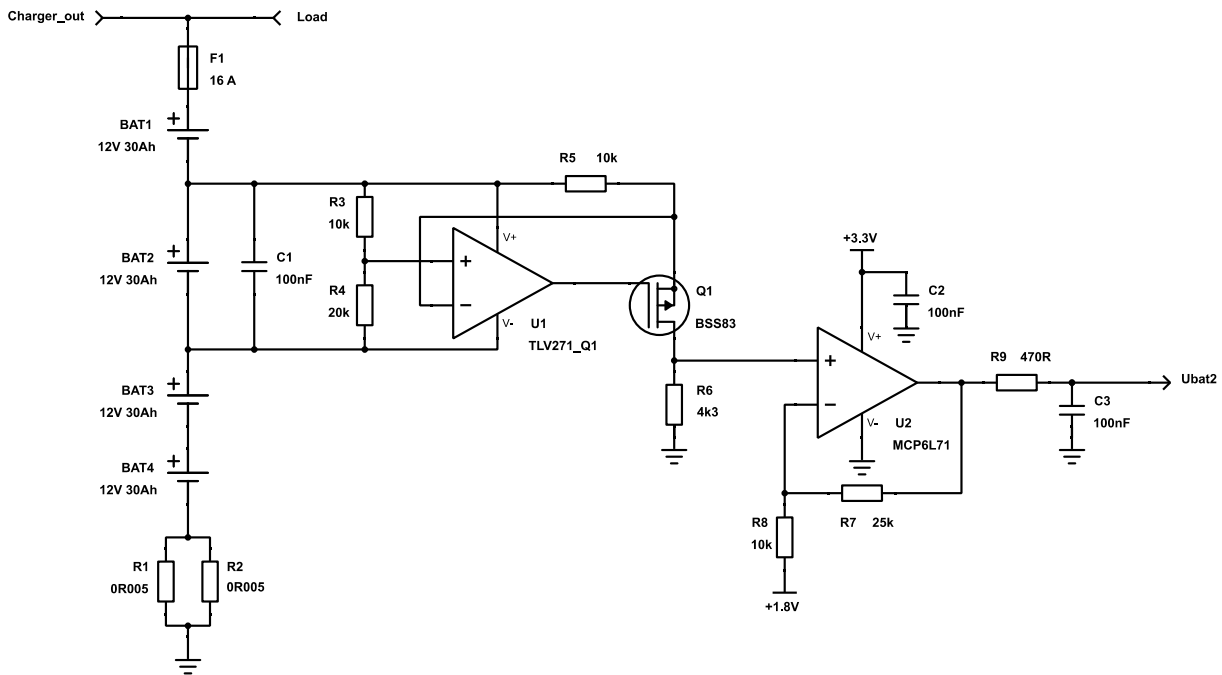




**Obr. 30 – Původní návrh měření napětí jednotlivých akumulátorů v akumulátorovém setu**

Aby tedy bylo možné měřit se stejným rozlišením na každém akumulátoru zvlášť, bylo využito odlišného principu měření. V předchozím měření bylo měřeno přímo napětí na olověných akumulátorech. Pro napájecí napětí operačních zesilovačů 3,3 V jsou však hodnoty napětí příliš vysoké, aby ho bylo možné měřit přímo. Výhodnějším řešením je převedení napětí jednotlivých akumulátorů na proud. Pokud je tento proud snímáný na vhodně navrženém snímacím rezistoru, můžeme docílit stejného výstupního rozsahu převodníku  $U/I$ , jako je vstupní napěťový rozsah A/D převodníku. Tím můžeme zajistit maximální možné rozlišení, které je možné docílit pomocí 12bitového A/D převodníku implementovaného v mikroprocesoru. Kompletní zapojení s výše popsáním principem měření napětí na jednotlivých akumulátorech je obsaženo v obr. 31.

První část s operačním zesilovačem TLV271\_Q1, ve schématu označeném jako  $U_1$ , implementuje zmíněný převodník napětí na proud, dále jen  $U/I$ . Základním rozdílem od předchozího zapojení je napájení operačního zesilovače přímo z měřeného akumulátoru. Díky tomu je možné dodržet maximální vstupní hodnoty operačního zesilovače. Operační zesilovač je tedy plovoucí, neboť má zvednutou zem. Napájení operačního zesilovače je zároveň blokováno kondenzátorem  $C_1$ .



**Obr. 31 – Konečný návrh měření napětí jednotlivých akumulátorů**

Celý převodník U/I má poté následující funkci. Operační zesilovač se neustále snaží dorovnat úroveň napětí na svém invertujícím a neinvertujícím vstupu. A to tak, že pokud je vyšší napětí na neinvertujícím vstupu, výstupní napětí se zvyšuje. Stejně tak pokud je vyšší napětí na invertujícím vstupu, výstupní napětí se snižuje. Záporná zpětná vazba je tedy dodržena tehdy, pokud je výstupní napětí regulováno pomocí invertujícího vstupu operačního zesilovače a neinvertující vstup slouží jako vstup referenčního napětí. Takto je řešeno i výsledné zapojení měření napětí. Pro nastavení napěťové reference slouží dělič napětí tvořený rezistory  $R_3$  a  $R_4$ , jehož výstup je připojen na neinvertující vstup operačního zesilovače. Dále výstup operačního zesilovače je připojen na svorku gate P-MOS tranzistoru BSS83, ve schématu  $Q_1$ . Ten slouží pro regulaci proudu, který protéká rezistorem  $R_5$ ,  $R_6$  a tranzistorem  $Q_1$ . Tyto tři prvky v podstatě tvoří napěťový dělič, jehož výstupní napětí je rovno

$$U_{R6} = U_{BAT2+} \cdot \frac{R_6}{R_5 + R_6 + R_{Q1\_DS\_on}} \quad (3.3/6)$$

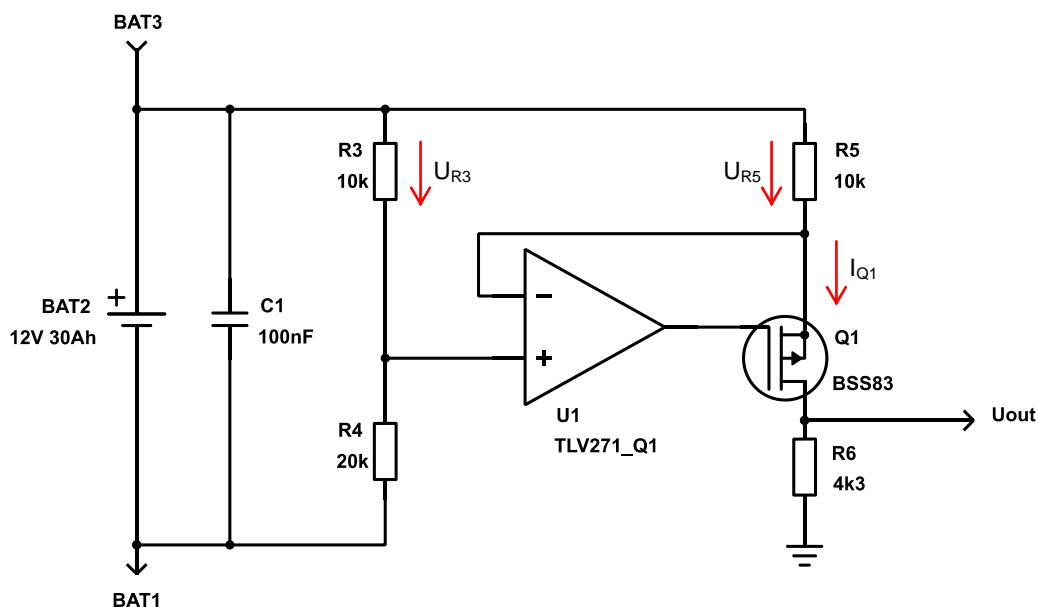
Případně je možné si představit výstup jako celkový úbytek napětí na rezistoru  $R_6$ , který je roven

$$U_{R6} = U_{BAT2+} - U_{R6} - U_{DS} \quad (3.3/7)$$

Rezistor  $R_{Q1\_DS\_on}$  je odpor tranzistoru  $Q_1$  v při sepnutém stavu mezi elektrodami D – drain a S – source (u bipolárního tranzistoru jsou to svorky kolektor a emitor). Tento odpor je nastavován pomocí napětí  $U_{GS}$ , tedy pomocí rozdílu napětí mezi svorkami source a G – gate (u bipolárního tranzistoru báze) a také pomocí proudu protékajícího tranzistorem. Pro použitý P-MOS tranzistor a pro konstantní proud platí, čím zápornější je napětí  $U_{GS}$ , tím menší je jeho odpor  $R_{DS\_on}$ . Při použití rezistoru  $R_5 = 10 \text{ k}\Omega$  a při maximálním napětí  $U_{bat4} = 14,4 \cdot 4 = 57,6 \text{ V}$ , nemůže být proud tranzistorem  $Q_1$  vyšší než

$$I_{D\_Q1\_max} = \frac{U_{bat4}}{R_5} = \frac{57,6}{10000} = 5,76 \text{ mA} \quad (3.3/8)$$

Pro tento proud a napětí  $U_{GS} = -4,5 \text{ V}$  je podle katalogového listu parametr  $R_{DS\_on}$  přibližně roven  $R_{DS\_on} = 3 \Omega$ .



**Obr. 32 – Původní návrh měření napětí jednotlivých akumulátorů v akumulátorovém setu**

Pro vysvětlení konkrétní funkce obvodu měření napětí jednotlivých baterií v akumulátorovém setu slouží jako pomůcka zjednodušené schéma zapojení, obr. 32. V tomto schématu není zakresleno napájení operačního zesilovače, které pro popis základní funkce nehraje roli. Funkce samotného obvodu pro převod napětí na proud je následující. Neinvertující vstup operačního zesilovače je připojen na výstupní napětí děliče  $R_3$  a  $R_4$ . Použité hodnoty rezistorů v děliči napětí rozdělí napětí mezi rezistory tak, že úbytek na rezistoru  $R_3$  ( $U_{R3}$ ) je roven třetině měřeného napětí, úbytek na rezistoru pak dvěma třetinám měřeného napětí. Můžeme tedy říci, že neinvertující vstup operačního zesilovače snímá úbytek napětí  $U_{R3}$ . Invertující vstup operačního zesilovače je připojen mezi rezistorem  $R_5$  a tranzistorem  $Q_1$ . Jak již bylo zmíněno, můžeme říci, že invertující vstup snímá úbytek napětí na rezistoru  $R_5$  ( $U_{R5}$ ). Funkcí operačního zesilovače je dorovnávat svým výstupem napětí na svých vstupech. Pokud je vyšší napětí na invertujícím vstupu, než na neinvertujícím, začne výstupní napětí klesat, a naopak. Operační zesilovač se tedy v tomto obvodu snaží svým výstupem vyrovnat napětí na svých vstupech, tedy snaží se vyrovnat úbytky napětí  $U_{R3}$  a  $U_{R5}$ . Jelikož má rezistor  $R_5$  pevnou hodnotu, musí mít operační zesilovač schopnost řídit proud  $I_{Q1}$ , který rezistorem protéká a způsobuje tak jeho napěťový úbytek. Možnost regulovat proud má operační zesilovač pomocí P-MOS tranzistoru BSS83. Jeho přirozenou vlastností je změna vnitřního odporu  $R_{DS\_on}$  v závislosti na napětí  $U_{GS}$ , které je operační zesilovač schopen měnit a tím měnit protékající proud  $I_{Q1}$ .

Pokud tedy dojde ke zvýšení měřeného napětí, dojde ke zvýšení napětí  $U_{R3}$ . Operační zesilovač tak musí dostatečně zvýšit proud  $I_{Q1}$ , aby se úbytek napětí  $U_{R5}$  dorovnal úbytku napětí  $U_{R3}$ . Pokud by bylo výstupní napětí operačního zesilovače konstantní, při zvýšení měřeného napětí by došlo díky zvýšení úbytku  $U_{R5}$  ke zvýšení napětí tranzistoru  $U_{GS}$ . Tím by došlo ke snížení  $R_{DS\_on}$  a enormně by se zvýšil proud  $I_{Q1}$ . Při zvýšení měřeného napětí tedy musí operační zesilovač zvyšovat svůj výstup tak, aby snížil protékající proud  $I_{Q1}$ , který vyvolá stejný úbytek  $U_{R5}$ , jako je  $U_{R3}$ . Celkově se však musí proud  $I_{Q1}$  zvýšit, aby se zvýšil

úbytek napětí  $U_{R5}$ . Tento vyrovnávací proud poté snímáme jako úbytek napětí na rezistoru  $R_6$ , kterým proud  $I_{Q1}$  protéká.

Rezistor  $R_6$  má takovou vypočtenou hodnotu, aby při měřeném napětí 15 V odpovídal jeho úbytek napětí 3 V. Tím je splněn požadavek pro maximální vstupní rozsah měřených napětí. Pro výpočet hodnoty rezistoru  $R_6$  je nejprve nutné vypočítat úbytek napětí  $U_{R3}$  pro vstupní napětí 15 V.

$$U_{R3} = R_3 \cdot I_{R3,R4} = R_3 \cdot \frac{U_{BAT2}}{R_3 + R_4} = 10 \cdot 10^3 \cdot \frac{15}{10 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^3} = 5 \text{ V} \quad (3.3/9)$$

Ve výše uvedeném popisu funkce obvodu měření napětí je uvedeno, že úbytek napětí  $U_{R3}$  je roven úbytku napětí  $U_{R5}$ . Platí tedy

$$U_{R3} = U_{R5} = 5 \text{ V} \quad (3.3/10)$$

Proud  $I_{Q1}$  lze tedy vypočítat následovně

$$I_{Q1} = \frac{U_{R5}}{R_5} = \frac{5}{10 \cdot 10^3} = 500 \text{ } \mu\text{A} \quad (3.3/11)$$

Tento proud protéká rezistorem  $R_6$ , jehož úbytek napětí musí být roven 3 V. Hodnota rezistoru je vypočtena jako

$$R_6 = \frac{U_{R6}}{I_{Q1}} = \frac{3}{500 \cdot 10^{-6}} = 6 \text{ k}\Omega \quad (3.3/12)$$

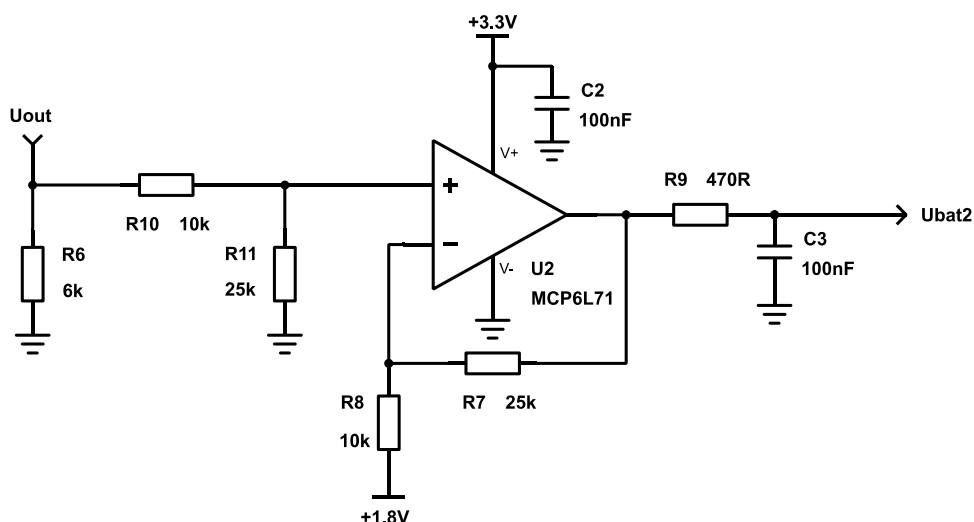
Další úpravou zapojení je zvýšení výstupního rozlišení pomocí omezení rozsahu měřených napětí na 9 až 15 V. Pro měřené napětí 9 V je úbytek napětí na rezistoru  $R_6$  roven

$$U_{R6} = R_6 \cdot \frac{U_{BAT2}/3}{R_5} = 6 \cdot 10^3 \cdot \frac{9/3}{10 \cdot 10^3} = 1,8 \text{ V} \quad (3.3/13)$$

Pro vstupní rozsah měřených napětí 9 až 15 V je výstupní rozsah napětí na rezistoru  $R_6 = 6 \text{ k}\Omega$  roven 1,8 V až 3 V. Aby bylo docíleno zvýšení výstupního rozlišení, je potřeba tento výstupní rozsah převést na vstupní rozsah A/D převodníku. Pokud bereme vstupní rozsah měřeného napětí A/D převodníku rovné 3 V a výstupní rozsah měření napětí na 1,2 V, můžeme určit požadované zesílení výstupního rozsahu měřeného napětí jako

$$A_{U_{R6}} = \frac{|U_{A/D}|}{|U_{U_{R6}}|} = \frac{3}{1,2} = 2,5 \quad (3.3/14)$$

Pro převedení napětíového rozsahu 1,8 V až 3 V na výstupní rozsah 0 až 3 V je použito zapojení s rozdílovým zesilovačem, viz obr. 33. Vstupní napětíový dělič rozdílového zesilovače je sloučen s rezistorem  $R_6$  tak, aby úroveň napětí na neinvertujícím vstupu odpovídala vstupnímu kladnému napětí rozdílového zesilovače v rozmezí 1,8 až 3 V, viz obr. 33.



**Obr. 33 – Zapojení pro úpravu výstupního rozlišení obvodu měření napětí**

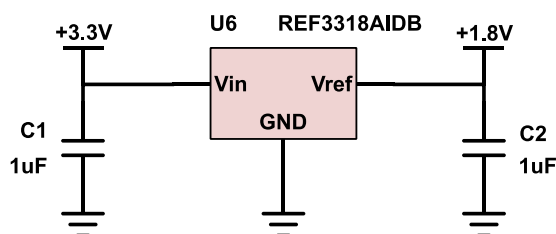
Ze zapojení je patrné, že rezistory  $R_{10}$  a  $R_{11}$  slouží pouze jako dělič úbytku napětí na odporu  $R_6$  s dělicím poměrem  $5/7$ . Pro zjednodušení lze tímto poměrem přímo snížit rezistor  $R_6$ , tedy

$$R_6 = 6 \cdot 10^3 \cdot \frac{5}{7} = 4,29 \text{ k}\Omega \cong 4,3 \text{ k}\Omega \quad (3.3/15)$$

Výstupní napětí  $U_{bat2}$  je dáno vztahem

$$U_{bat2} = A_{U_{R_6}} \cdot (U_+ - U_{ref}) = 2,5 \cdot (U_+ - 1,8) \text{ [V]} \quad (3.3/16)$$

Referenční napětí je vytvořeno pomocí napěťové reference REF3318AIDB, viz obr. 34.



**Obr. 34 – Zapojení napěťové reference REF3318AIDB**

Výstupní napětí rozdílového zesilovače je upraveno pomocí RC filtru s mezní frekvencí  $f_m \approx 21277 \text{ Hz}$ . Operační zesilovače  $U_1$  a  $U_2$  mají blokované napájení keramickým kondenzátorem s kapacitou  $100 \text{ nF}$ . Toto zapojení obvodu měření napětí je možné použít pouze pro měřená vstupní napětí od  $3 \text{ V}$ , neboť je tato hodnota minimálním napájecím napětím operačního zesilovače.

### 3.4 Návrh obvodu pro měření teploty

V kapitole 2.3.2 jsou stanoveny požadavky na měření teploty olověných akumulátorů. Tuto informaci potřebuje modul olověných akumulátorů pro korekci nabíjecího napětí a také pro účely diagnostiky celkové životnosti akumulátorů. Požadavky na obvod měření teploty jsou shrnuty v tabulce 5.

Parametr obvodu měření proudu	Hodnota
Měřicí rozsah teplot	-40 až +80 °C
Rozlišení měřené teploty	1 °C
Počet senzorů teploty	2

**Tabulka 5 – Souhrn požadavků pro obvod měření teploty**

Pro zjednodušení celkového návrhu obvodu měření teploty, bylo namísto řešení s použitými kovovými senzory, jako například Pt100, použito řešení pomocí integrovaného polovodičového teploměru LM35CZ. Tento obvod má výhodu především v analogovém výstupu, který odpovídá měřené teplotě. Základní parametry senzoru LM35CZ jsou uvedeny v tabulce 6.[34]

Parametr senzoru LM35CZ	Hodnota
Rozsah měřených teplot	-40 až +110 °C
Rozlišení měření teploty	±0,5 °C
Maximální napájecí napětí	30 V

**Tabulka 6 – Souhrn základních parametrů senzoru LM35CZ**

Závislost výstupního napětí na změřené teplotě je následující

$$U_{T_{meas}} = 0,01 \cdot T_{meas} [V] \quad (3.4/1)$$

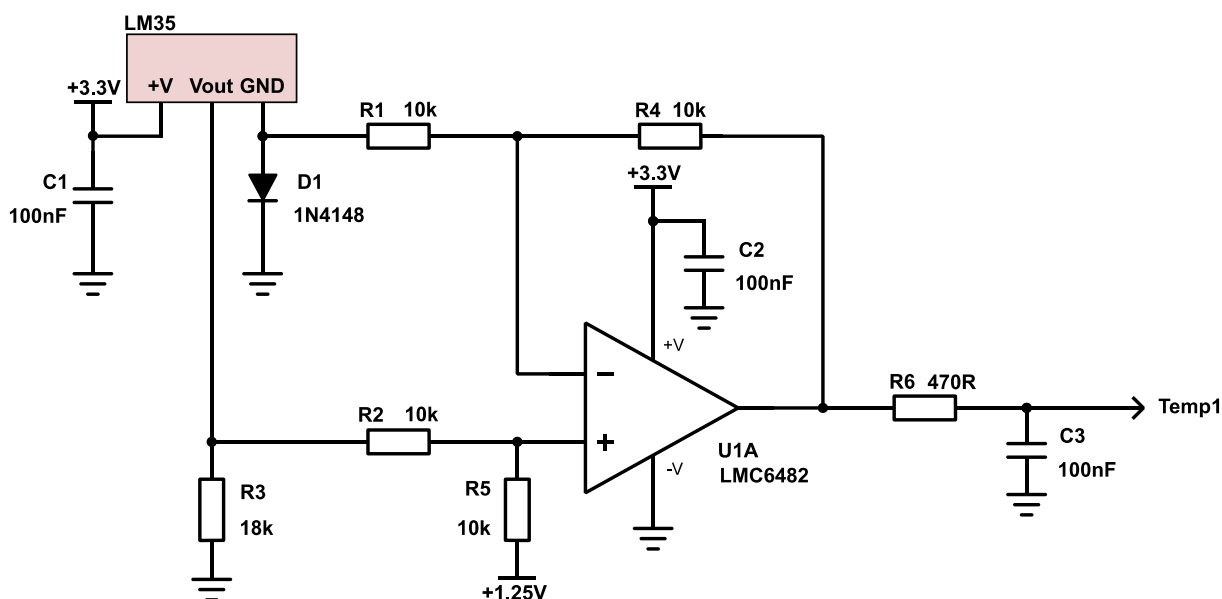
Výstupní napětí tedy roste s teplotou 10mV/°C. Pro teplotní rozsah stanovený v požadavcích na obvod měření napětí, je výstupní napětí senzoru LM35CZ rovné

$$|U_{T_{meas}}| = \langle -0,4; 0,6 \rangle V \text{ pro } T_{meas} = \langle -40; 60 \rangle ^\circ C \quad (3.4/2)$$

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, vstupní napěťový rozsah A/D převodníku v mikroprocesoru je roven 0 až 3,3 V. Není proto možné připojit výstup senzoru přímo na vstup A/D převodníku, protože by nebylo možné měřit záporné hodnoty napětí odpovídající záporným změřeným teplotám. Byl proto navržen obvod, viz obr. 35.

Tento obvod vychází ze zapojení uvedeného v katalogovém listu senzoru LM35CZ. [34 (fig. 18)] Jedná se o úpravu základního zapojení senzoru, aby bylo možné měřit celý rozsah teplot pomocí unipolárního napájení senzoru. Základem je zapojení polovodičové diody  $D_1$  mezi svorkou senzoru GND a nulovým potenciálem na modulu olověných akumulátorů. Tím dojde ke zvednutí nuly senzoru o propustné napětí na diodě  $D_1$ . Celkové výstupní napětí je poté rovné rozdílu výstupu napětí a posunutě nuly senzoru, tedy propustnému napětí diody  $D_1$ . Posunutí nuly senzoru posouvá tedy i výstupní napětí senzoru,

proto je celkový výstup nezávislý na velikosti propustného napětí. Základní podmínkou je pouze zajištění, aby bylo propustné napětí diody  $D_1$  větší, než je maximální záporné výstupní napětí senzoru při měření maximální záporné teplotě. Teplotní závislost propustného napětí diody nemusíme brát v úvahu.

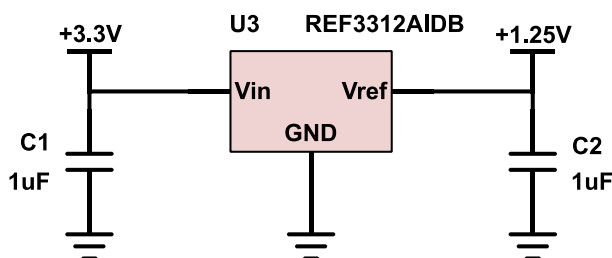


**Obr. 35 – Obvod měření teploty olověných akumulátorů**

Aby bylo možné převést rozdílové napětí senzoru na měřitelný rozsah A/D převodníku, je výstup připojen na rozdílový zesilovač s operačním zesilovačem  $U_1$ . Aby bylo možné měřit také záporné vstupní napěťové rozdíly, je výstup rozdílového zesilovače posunut o napěťový offset 1,25 V. Všechny rezistory v obvodu mají stejnou hodnotu, a proto je zesílení rovno  $A_{U1} = 1$ . Jedná se tedy o rozdílový sledovač, jehož výstupní napětí je určeno vztahem

$$U_{Temp1} = A_{U1} \cdot (U_{out} - U_{D1}) + 1,25 = (U_{out} - U_{D1}) + 1,25 \text{ [V]} \quad (3.4/3)$$

Referenční napětí, které slouží jako napěťový offset rozdílového zesilovače s operačním zesilovačem  $U_1$ , je vytvořeno pomocí napěťové reference REF3312AIDB, viz obr. 36.



**Obr. 36 – Zapojení napěťové reference REF3312AIDB**

Na modulu olověných akumulátorů je obvod měření teploty navržen tak, aby bylo možné připojit dva senzory teploty LM35CZ. Rozdílové zesilovače jsou řešeny pomocí dvojitého operačního zesilovače LMC6482, který má blokované napětí keramickým 100nF kondenzátorem. Dva senzory teploty jsou potřeba proto, aby bylo možné měřit teplotu na více místech v akumulátorovém setu, pokud by například nebyly umístěny všechny akumulátory

ve stejné výšce. Připojení senzoru je řešeno tak, aby bylo možné měřit přímou teplotu akumulátoru na kladné elektrodě. Senzor teploty LM35CZ je zobrazen na obr. 37.



**Obr. 37 – Senzor teploty LM35CZ**

### 3.5 Návrh obvodu nabíjecího zdroje proudu a napětí

#### 3.5.1 Návrh a výpočet obvodu nabíjecího zdroje

Nabíjecí zdroj je hlavní částí modulu olověných akumulátorů. Cílem jeho implementace je možnost otestovat nabíjecí algoritmy a také parametry nabíjení akumulátorů FIAMM 12FGL33. Základní požadavky na nabíjecí zdroj jsou popsány v kapitole 2.5. Jejich shrnutí je obsaženo v tabulce 7.

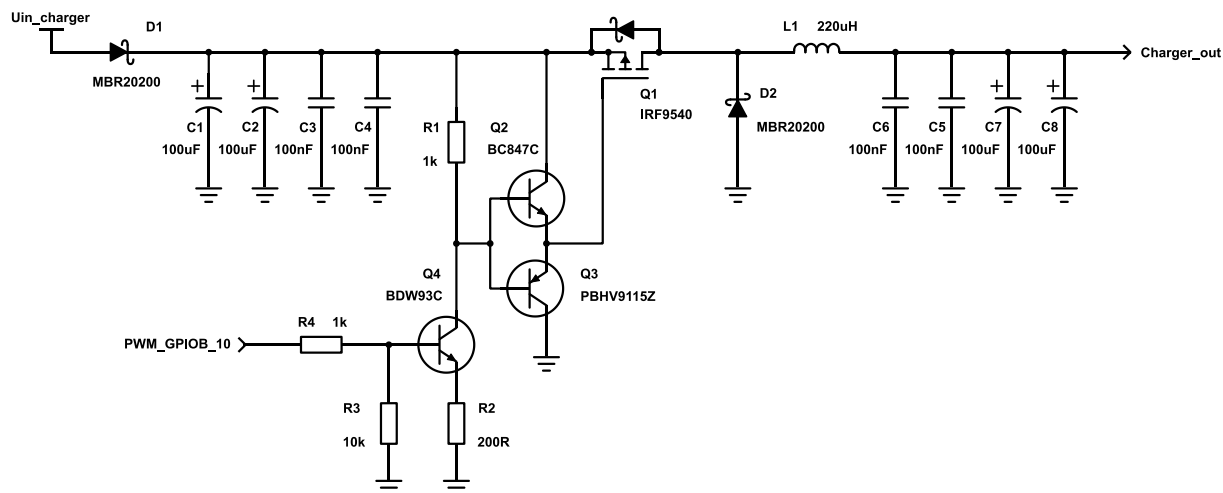
Základní koncepce nabíjecího zdroje je již naznačena v blokovém schématu, obr. 24. Jako nejjednodušší řešení byl zvolen snižující DC/DC měnič. Se vstupním předpokladem použití modulu olověných akumulátorů pouze v laboratorních podmínkách, není potřeba implementovat zdroj, který by převáděl síťové napětí  $230\text{ V}_{AC}$  na stejnosměrné napětí  $75\text{ V}_{DC}$ , které slouží jako vstupní napětí nabíjecího zdroje. Pro tyto účely je použit laboratorní zdroj, s výstupním výkonem  $240\text{ W}$ . Obvod navrženého snižujícího měniče nabíjecího zdroje je zobrazen na obr. 38.

Parametr nabíjecího zdroje	Hodnota
Maximální výstupní napětí	<b>min. 57,6 V</b>
Maximální výstupní proud	<b>min. 3 A</b>
Maximální výstupní výkon	<b>min. 173 W</b>
Minimální výstupní proud	<b>10 mA při napětí 54,48 V</b>
Vstupní napětí	<b><math>75\text{ V}_{DC}</math></b>

**Tabulka 7 – Souhrn základních parametrů nabíjecího zdroje**



Jádrem snižujícího měniče je zapojení P-MOS tranzistoru  $Q_1$ , Schottkyho diody  $D_2$ , tlumivky  $L_1$  a elektrolytických kondenzátorů  $C_7$  a  $C_8$ . Tyto zapojené prvky tvoří základní koncepci snižujícího měniče napětí, který je detailně popsán v následujících publikacích [10].



**Obr. 38 – Návrh obvodu nabíjecího zdroje**

Snižující měnič se také nazývá spínaným zdrojem, neboť se využívá přechodového jevu cívky. Spínané zdroje jsou tedy řízené pomocí pulzně-šířkové modulace (PWM), kdy periodicky dochází k přechodovému jevu cívky  $L_1$ . Základem návrhu snižujícího měniče je tedy výpočet doby sepnutí spínacího prvku. Doba sepnutí spínacího prvku  $t_{on}$  a doba jedné periody PWM signálu  $\tau$  jsou základní parametry, které jako jediné udávají, jaký je poměr mezi vstupním a výstupním napětím. Vztah pro výpočet výstupního napětí snižujícího měniče je následující [10]

$$U_{charger\_out} = U_{in\_charger} \cdot \frac{t_{on}}{\tau} [V] \quad (3.5.1/1)$$

Úpravou můžeme vzorec (3.5/1) upravit pro výpočet doby sepnutí spínacího tranzistoru  $Q_1$  následovně

$$t_{on} = \frac{\tau \cdot U_{charger\_out}}{U_{in\_charger}} [s] \quad (3.5.1/2)$$

Dalším krokem při výpočtu je stanovení špičkového proudu, pro který je měnič navrhován. Obecný vztah pro špičkový proud je roven [10 (eq. 2)]

$$I_{pk} = 2 \cdot I_{max} [A] \quad (3.5.1/3)$$

Následujícím krokem návrhu snižujícího měniče je výpočet hodnoty indukčnosti tlumivky  $L_1$ . Vztah pro její výpočet je odvozen z obecného vztahu pro napětí na cívce, tedy [10]

$$u_L = -L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (3.5.1/4)$$

Z výše uvedeného vztahu (3.5.1/4) je následně odvozen výsledný vztah pro indukčnost ve snižujícím měniči [10 (eq. 1)]

$$L = \frac{(U_{in\_charger} - U_{charger\_out} - U_{Q1}) \cdot t_{on}}{I_{pk}} [H] \quad (3.5.1/5)$$

Nyní je možné vypočítat konkrétní hodnoty pro vstupní požadavky nabíjecího zdroje modulu olovených akumulátorů. Hodnoty jsou u snižujících měničů vždy vypočteny pro nejmenší výstupní proudy. Nejprve je nutné vypočítat dobu sepnutí tranzistoru  $Q_1$ . Experimentálně bylo zjištěno, že rozlišení nastavené střídavy PWM signálu na 0,01% lze v mikroprocesoru dosáhnout při frekvenci  $f = 83,3$  kHz. Doba sepnutí je poté rovna

$$t_{on} = \frac{\tau \cdot U_{charger\_out}}{U_{in\_charger}} = \frac{1}{83300} \cdot 54,5 = 8,723 \mu s \quad (3.5.1/6)$$

Minimální špičkový proud je roven

$$I_{pk} = 2 \cdot I_{max} = 2 \cdot 0,01 = 0,02 A \quad (3.5.1/7)$$

Pro výpočet indukčnosti je nutné vypočítat úbytek napětí na spínacím tranzistoru  $Q_1$ . Dle katalogu má tranzistor  $Q_1$  IRF9530 parametr  $R_{DS\_on}$  rovný  $200$  m $\Omega$  při napětí  $U_{GS} = -10$  V. Pro minimální nabíjecí špičkový proud  $I_{charg} = 20$  mA je úbytek napětí roven

$$U_{Q1} = R_{DS\_on\_Q1} \cdot I_{charg} = 0,2 \cdot 0,02 = 4 mV \quad (3.5.1/8)$$

Následně je možné vypočítat hodnotu indukčnosti  $L_1$

$$L_1 = \frac{(U_{in\_charger} - U_{charger\_out} - U_{Q1}) \cdot t_{on}}{I_{pk}} = \frac{(75 - 54,5 - 0,004) \cdot 8,723 \cdot 10^{-6}}{0,02} \quad (3.5.1/9)$$

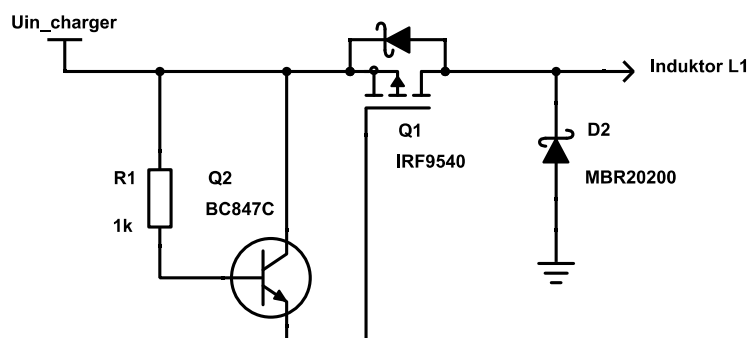
$$L_1 = 8,939 mH$$

Pro maximální nabíjecí špičkový proud  $I_{charg} = 6$  A nejsou dostupné žádné tlumivky s touto vypočtenou hodnotou indukčnosti. Nejbližší dostupnou indukčností tlumivky s maximálním efektivním proudem  $11$  A je  $L_1 = 220$   $\mu$ H. Jako volnoběžná dioda  $D_2$  je zvolena Schottkyho dioda MBR20200, s maximálním reverzním napětím  $200$  V a propustným proudem  $10$  A. Elektrolytické kondenzátory  $C_7$  a  $C_8$  slouží ve snižujícím měniči napětí jako výstupní kapacity pro filtraci výstupního napětí a také pro pokrytí výstupního proudu. Kondenzátory mají kapacitu  $100$   $\mu$ F a jedná se o kondenzátory s nízkým vnitřním odporem (low ESR). Díky nízkému vnitřnímu odporu elektrolytických kondenzátorů nedochází k vysokým výkonovým ztrátám v kondenzátoru a nedochází tak ke snižování jejich životnosti. Stejnou funkci tvoří také elektrolytické kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$ , avšak jako vstupní kapacity měniče. Keramické kondenzátory  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$  a  $C_7$  slouží jako filtrační kondenzátory pro vyšší harmonické. Schottkyho dioda  $D_1$  je v zapojení nabíjecího zdroje použita jako ochrana proti toku proudu z akumulátorů na výstupu nabíječe do zdroje vstupního napětí, čímž by mohlo dojít k jeho poškození. Diody  $D_1$  a  $D_2$  jsou Schottkyho, neboť má tento typ nízký úbytek napětí, čímž jsou sníženy jejich výkonové ztráty.

Zbývající prvky v obvodu nabíjecího zdroje tvoří zapojení proudového budiče tranzistoru  $Q_1$ . Tento typ obvodu je potřeba při rychlém spínání MOS tranzistorů, které jsou zapojeny mezi

kladným pólem napájecího zdroje a zátěží. Takovéto zapojení prvků, například tranzistorů, se nazývá high-side, tedy prvky zapojené v kladné větvi. Budiče MOS tranzistorů odstraňují problém s velkou kapacitou mezi strukturou elektrody Gate a Source. Aby bylo možné rychle spínat i rozepínat MOS tranzistor, musí dojít k rychlému dodání a odebrání náboje z elektrody Gate. Nejčastěji se jako budiče high-side P-MOS tranzistorů používají integrované obvody. Řešení použité v modulu olověných akumulátorů je řešeno pomocí diskretních součástek. Je to především z důvodu jednoduššího pochopení funkce obvodu a možnosti dimenzování jednotlivých součástek zvlášť.

Funkce budiče high-side P-MOS tranzistoru  $Q_1$  je následovně. Pro otevření tranzistoru  $Q_1$  IRF9530 je minimální nutné napětí  $U_{GS} = -10$  V. Vstup budiče PWM\_GPIOB\_10 je připojen přímo z výstupu mikroprocesoru, tedy napětí se pohybuje mezi 0 až 3,3 V. První fáze funkce budiče nastává při vstupním napětí 0 V. V této fázi je NPN tranzistor  $Q_3$  zavřený a neprotéká jím tak proud. Na rezistoru  $R_1$  tak vznikne pouze zanedbatelný úbytek napětí způsobený tokem proudu do báze tranzistoru  $Q_2$ , ten má tedy na své bázi i kolektoru téměř stejné napětí. Toto zapojení se také nazývá napěťový sledovač. Jeho funkcí je sledovat napětí na bázi tranzistoru, v tomto případě vstupní napětí nabíjecího zdroje. Tato hodnota napětí je tedy zároveň na elektrodě Gate tranzistoru  $Q_1$ . Napětí  $U_{GS\_Q1}$  je tedy téměř 0 V a tranzistor  $Q_1$  je uzavřen. PNP tranzistor  $Q_3$  je při vstupním napětí budiče 0 V zavřený, protože je napětí  $U_{BE\_Q3}$  rovno přibližně 0 V. Principiální zapojení budiče při vstupním napětí 0 V je zobrazeno na obr. 39.



**Obr. 39 – Principiální zapojení pro sepnutý budič v nabíjecím zdroji**

Pro vstupní napětí budiče 3,3 V dojde k sepnutí NPN tranzistoru  $Q_4$ . Tranzistor  $Q_4$  nemá elektrodu Emitor připojenou přímo na nulový potenciál, ale je zde zapojen rezistor  $R_2$ . Při konstantním vstupním napětí budiče a při zanedbání teplotní závislosti tranzistoru  $Q_4$  můžeme považovat úbytek  $U_{R2}$  za konstantní. Proto rezistorem  $R_2$ , a tedy i tranzistorem  $Q_4$ , protéká konstantní proud, který je roven

$$I_{R2} = I_{Q4} = \frac{U_{GPIOB\_10} - U_{BE\_sat\_Q4}}{R_2} \cong \frac{3,3 - 0,6}{200} = \frac{2,7}{200} = 13,5 \text{ mA} \quad (3.5.1/10)$$

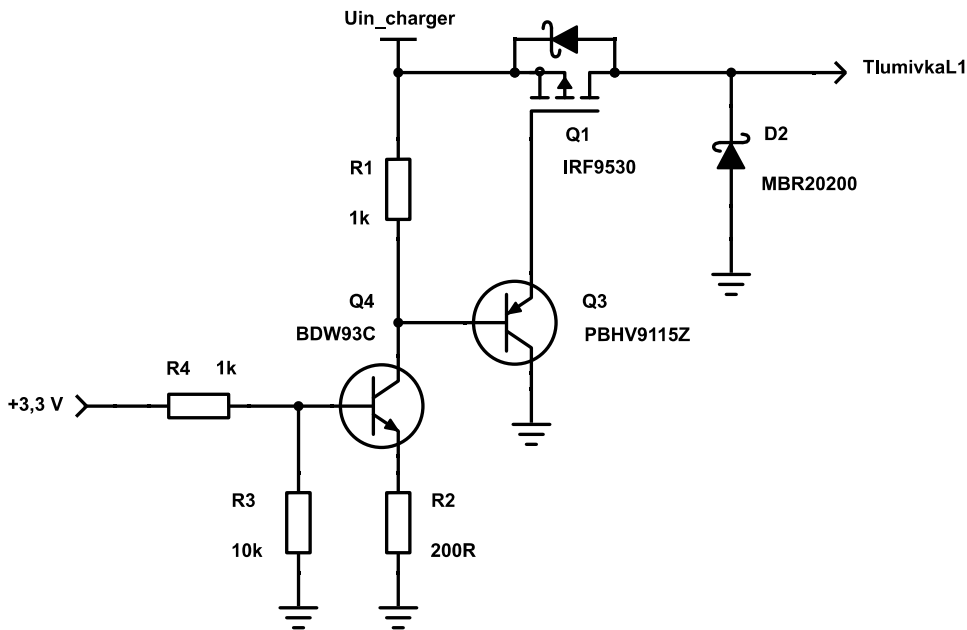
Proud tranzistorem  $Q_4$  protéká také rezistorem  $R_1$ , na kterém vybudí úbytek napětí

$$U_{R1} = I_{Q4} \cdot R_1 \cong 0,0135 \cdot 1000 = 13,5 \text{ V} \quad (3.5.1/11)$$

Na bázi tranzistoru  $Q_2$  a  $Q_3$  je nyní přibližně 62,5 V. Náboj na elektrodě Gate tranzistoru  $Q_1$  stále udržuje hodnotu vstupního napájecího napětí, tranzistor  $Q_2$  je tedy možné považovat za odpojený, neboť napětí mezi bázi a emitorem je přibližně rovno  $U_{BE\_Q2} = -13,5$  V. Z tranzistoru  $Q_3$  se naopak stává napěťový sledovač svého bázového napětí, neboť jeho napětí

báze-emitor je rovno také  $U_{BE_{Q3}} = -13,5 \text{ V}$ , čímž dojde k jeho otevření. Z kapacity na elektrodě Gate tranzistoru  $Q_1$  dojde k odčerpání náboje do úrovně bázového napětí tranzistoru  $Q_3$ , tedy napěťového sledovače. Na tranzistoru  $Q_1$  vznikne napětí  $U_{GS_{Q1}} = -13,5 \text{ V}$  a tím dojde k jeho otevření, tedy rapidnímu snížení parametru  $R_{DS_{on_{Q1}}}$ . Principiální zapojení budiče při vstupním napětí  $3,3 \text{ V}$  je zobrazeno na obr. 40.

Urychlené spínání je tedy způsobeno vysokým proudem, kterým budič dodává, případně odebírá náboj z elektrody Gate tranzistoru  $Q_1$ , přímo tranzistory  $Q_2$  a  $Q_3$ . Nejvíce zatěžovaný je v zapojení budiče NPN tranzistor  $Q_4$  BDW93C. Byl proto vybrán v provedení s pouzdrém TO-220, aby ho bylo možné pasivně chladit. NPN tranzistor  $Q_2$  je zatěžován jen minimálně, byl proto použit tranzistor BC847C v pouzdře SOT-23. PNP tranzistorem  $Q_3$  PBHV9115Z neprotékají příliš vysoké proudy, musí však vydržet vyšší napětí mezi kolektorem a emitorem. Vznikají na něm vyšší výkonové ztráty a bylo tak vybráno řešení v pouzdře SOT-223.

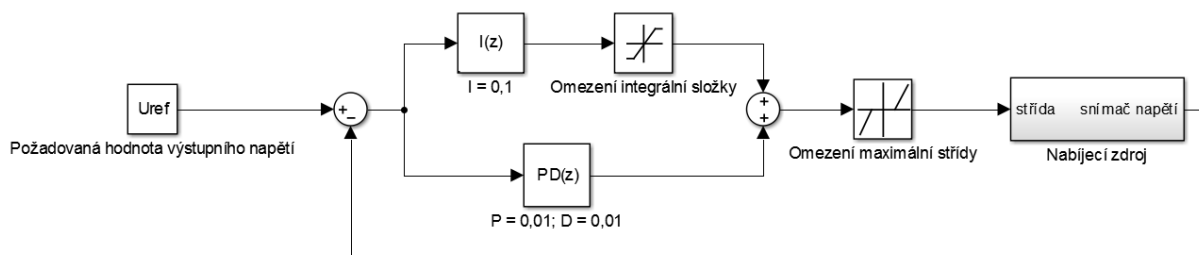


Obr. 40 – Principiální zapojení pro sepnutý budič v nabíjecím zdroji

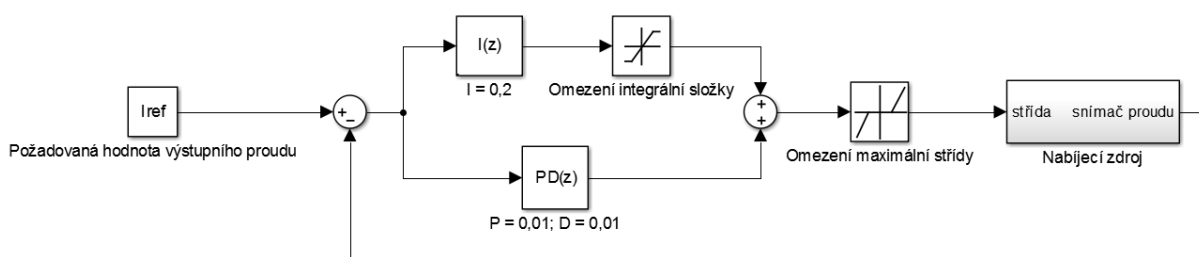
### 3.5.2 Popis implementace regulační smyčky nabíjecího zdroje

Jak je již popsáno v kapitole 2.2.3, nabíjecí algoritmy olověných akumulátorů se skládají z částí, kdy jsou akumulátory nabíjeny konstantním napětím a konstantním proudem. Nabíjecí zdroj tedy musí pracovat jako zdroj konstantního napětí, a také zdroj konstantního proudu. Tyto dva pracovní módy jsou realizovány pomocí veličiny, kterou snímají. Aby byl výstup stabilizovaný, je zapotřebí, aby byla uzavřena regulační smyčka nabíjecího zdroje. S její pomocí je nabíjecí zdroj schopen udržet na svém výstupu konstantní referenční veličinu. Regulační smyčku nabíjecího zdroje je možné realizovat autonomně (analogově) a externě pouze měnit referenční veličinu. Díky použitému mikroprocesoru na modulu olověných akumulátorů je však regulační smyčka uzavřena přes mikroprocesor, který v sobě zároveň implementuje regulátor a přepínač mezi vstupy měřených veličin. Tím je tedy schopen přepínat mezi módy konstantního zdroje napětí a proudu. Pro tyto dva jednotlivé módy je zároveň díky použitému mikroprocesoru možné použít rozdílné regulátory a tím zlepšit výstupní parametry nabíjecího zdroje, jako je celková dynamika zdroje a výstupní zvlnění. Zjednodušené zobrazení regulační smyčky konstantního zdroje napětí je obsaženo v obr. 41, pro konstantní proud se jedná o obr. 42. Perioda každé regulační smyčky je rovna

$\tau_{reg} = 0,2$  ms. Při vyšší použité periodě dochází k problému při režimu konstantního proudu s výstupem 3 A. Za dobu jedné periody regulátoru není výstupní kapacita nabíjecího zdroje schopná pokrýt proudový odběr a dochází k oscilaci výstupní hodnoty proudu. Výstupní proud nabíjecího zdroje v chybovém stavu je zobrazen v příloze 1.



**Obr. 41 – Regulační smyčka konstantního zdroje napětí**



**Obr. 42 – Regulační smyčka konstantního zdroje proudu**

### 3.6 Popis obvodu pro vybíjení olověných akumulátorů

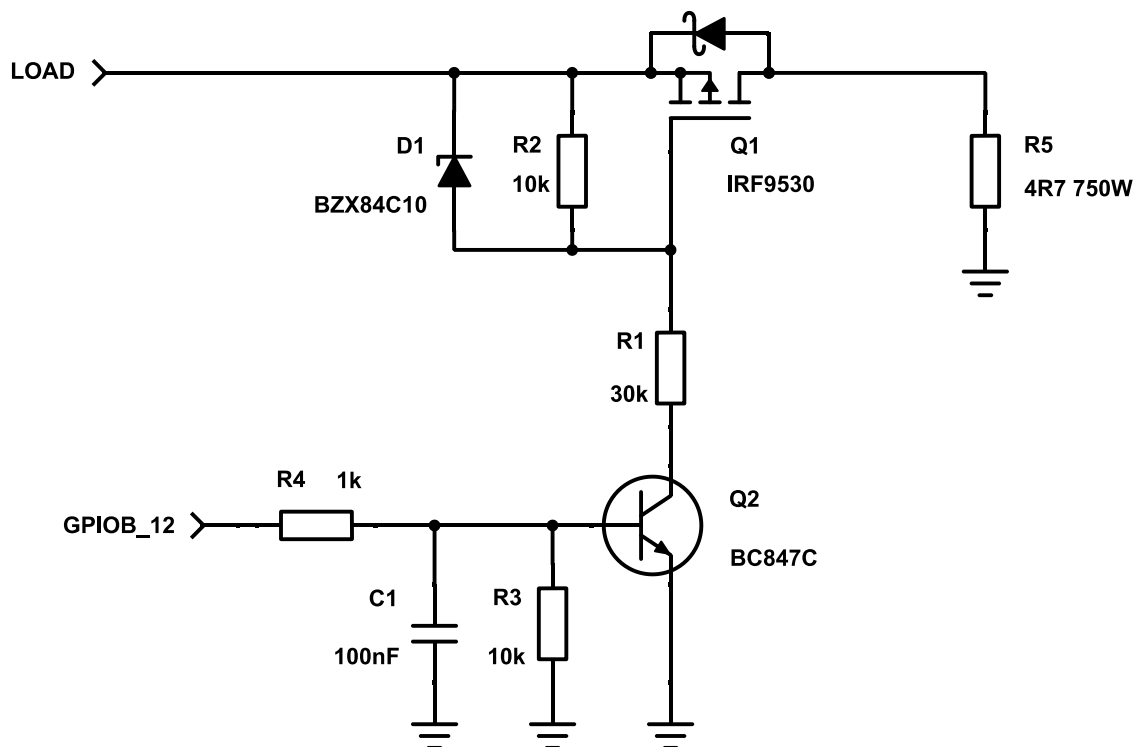
Aby bylo možné pomocí modulu olověných akumulátorů měřit jejich vnitřní odpor a zároveň provádět jejich cyklování, implementuje modul obvod pro spínání zátěže olověných akumulátorů. Jako zatěžovací prvek je použit výkonový rezistor s maximálním ztrátovým výkonem 750 W. Jeho hodnota je vypočtena tak, aby byl vybíjecí proud minimálně 10 A. Maximální hodnota napětí akumulátorového setu nastává při plynovacím napětí a je rovna 57,6 V, viz kapitola 2.2.3. Maximální velikost zatěžovacího rezistoru je tedy rovna

$$R_{load} = \frac{U_{aku\_max}}{I_{load\_min}} = \frac{57,6}{10} = 5,76 \Omega \quad (3.6/1)$$

Z dostupných hodnot výkonových rezistorů byla zvolena hodnota 4,7  $\Omega$  při 20 °C. Vybíjecí proud není regulován, neboť testovací modul olověných akumulátorů není přímo určen pro vybíjecí testy, nýbrž pro cyklování a krátkodobé zatěžování akumulátorů. Zapojení obvodu pro připojení zátěže k akumulátorům je zobrazen na obr. 43.

Zapojení je realizováno se vstupním požadavkem, který udává pouze potřebu občasného sepnutí, či vypnutí zátěže. Nejedná se tedy o případ rychlého periodického spínání, jako u nabíjecího zdroje, popsaného v kapitole 3.5. Hlavní spínací prvek, P-MOS tranzistor  $Q_1$  (IRF9530), tedy není nutné spínat specializovaným budičem, nýbrž postačí základní zapojení s NPN tranzistorem  $Q_2$  BC847C. Jeho funkce je následující. Pokud je na vstupu GPIOB\_12 0 V, tranzistor  $Q_2$  je zavřený a neprotéká jím proud. Na rezistoru  $R_2$  je poté nulový úbytek napětí a tím je hodnota napětí  $U_{GS\_Q1}$  tranzistoru  $Q_1$  rovno 0 V. Tranzistor  $Q_1$  je tedy pro vstupní napětí 0 V uzavřený a neprotéká jím proud. Při vstupním napětím 3,3 V dojde

k otevření tranzistoru  $Q_2$ , čímž začne protékat proud rezistorem  $R_2$ ,  $R_1$  a zenerovou diodou  $D_1$ . Díky zenerově diodě  $D_1$  typu BZX84C10 se zenerovým napětím 10 V bude úbytek na rezistoru  $R_2$  také roven 10 V. Napětí  $U_{GS\_Q1}$  je poté rovno -10 V a tranzistor  $Q_1$  se tím otevře a začne jím protékat vybíjecí proud. Keramický kondenzátor  $C_1$  slouží pouze jako filtr vyšších harmonických, neboť je na DPS obvod spínání zátěže výrazně vzdálený od řídicího mikroprocesoru.



Obr. 43 – Návrh obvodu pro spínání zátěže k olověným akumulátorům

### 3.7 Popis digitálního jádra modulu

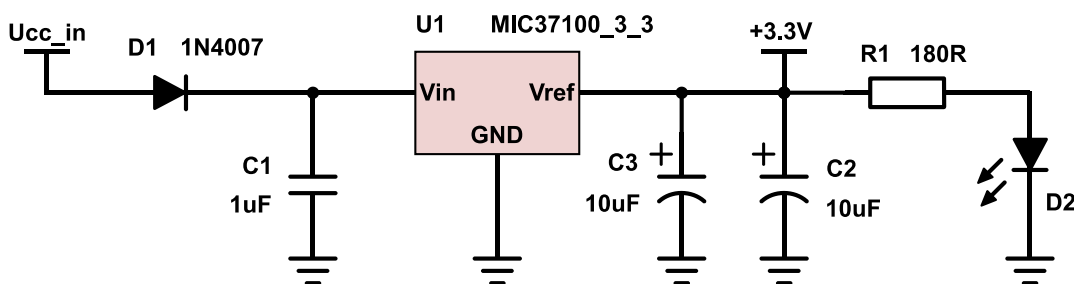
Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1 a zobrazeno v podrobném blokovém schématu modulu olověných akumulátorů, obr. 24, hlavním řídicím prvkem modulu olověných akumulátorů je mikroprocesor STM32F407VG firmy ST microelectronics. Tento mikroprocesor byl vybrán pro jeho široké využití ve všech odvětvích elektroniky a s tím spojené rozsáhlé podpory v podobě hardwarové i softwarové pomoci. Pro účely modulu olověných akumulátorů jsou využity periferie vypsány v tabule 8. [9]

Periferie mikroprocesoru	Parametr
A/D převodník	12-bitový, ADC1, ADC2 i ADC3 – zpracování měření veličin z modulu
Čítač/časovač	16-bitový, TIM3, TIM4 – generování časové základny pro vypisování naměřených veličin a regulátor nabíjecího zdroje

Čítač/časovač	32-bitový, TIM2 – generování PWM signálu pro řízení nabíjecího zdroje
GPIO porty	Vstupní i výstupní piny sloužící pro čtení dat z uživatelských tlačítek, signalizace pomocí LED diod a spínání periférií modulu
USART	USART1, 8 bit, bez parity, 115200 Bd – použití pro výpis naměřených veličin modulu do PC
DMA (Direct Memory Access)	DMA2, připojeno na ADC1, ADC2 a ADC3 – využití pro uložení naměřených dat z A/D převodníku přímo do Flash paměti v mikroprocesoru – zrychlení běhu programu mikroprocesoru
SWD	Komunikační rozhraní pro možnosti nahrávání a debuggování programu v mikroprocesoru

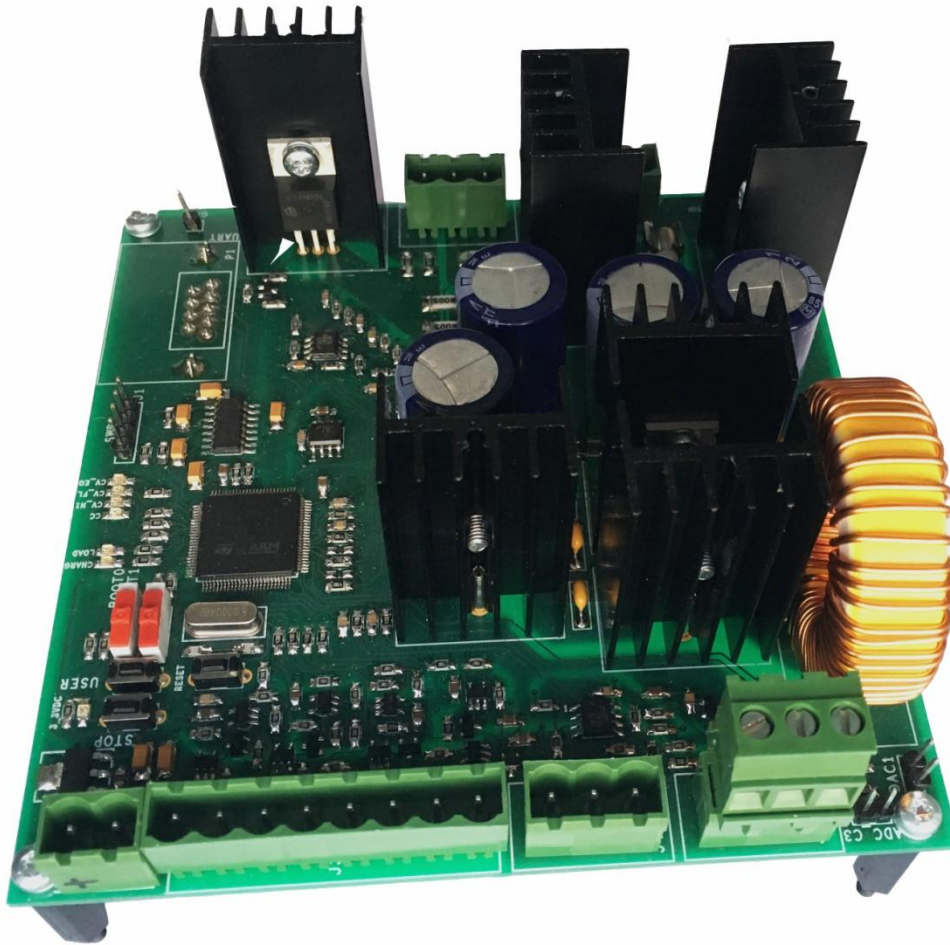
**Tabulka 8 – Výpis využitých periférií mikroprocesoru STM32F407VG**

Návrh obvodu digitálního jádra modulu olověných akumulátorů s mikroprocesorem STM32F407VG je obsaženo v příloze 2. Veškeré obvody v modulu olověných akumulátorů jsou napájeny napětím 3,3 V, které je tvořeno lineárním stabilizátorem s nízkým úbytkem napětí (LDO) MIC37100\_3\_3. Zapojení zdroje napětí pro hlavní napájecí napětí 3,3 V je obsaženo v obr. 44. Dioda  $D_1$  1N4007 slouží v obvodu proti přepólování vstupního napětí  $U_{cc\_in}$ . Rezistor  $R_1$  a LED dioda  $D_2$  slouží jako indikace korektní funkce napájecího zdroje 3,3 V.



**Obr. 44 – Zapojení lineárního stabilizátoru MIC37100\_3\_3**

Kompletní schéma modulu olověných akumulátorů včetně návrhu desky plošných spojů je součástí příloženého CD k této práci. Fotografie realizovaného testovacího modulu olověných akumulátorů je obsažena v obr. 45.



Obr. 45 – Testovací modul olověných akumulátorů

### 3.8 Základní popis řídicího programu

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, hlavním řídicím prvkem v modulu olověných akumulátorů je mikroprocesor STM32F407VG. Ten v sobě implementuje program pro funkci nabíjení a vybíjení akumulátorů. Mezi těmito dvěma módy se přechází pomocí přijatých znaků ze sériové linky, modul olověných akumulátorů mezi těmito stavy nepřechází samovolně. Třístavový nabíjecí cyklus je však autonomní. Modul olověných akumulátorů tedy přechází mezi třemi základními módy, kterými jsou

1. Klidový stav – baterie odpojené od zátěže a nabíjecího zdroje (znak “X“, tlačítko STOP, svítí zelená LED dioda s popisem CV\_EQ)
2. Nabíjení – třístavový algoritmus nabíjení akumulátorů (jakýkoliv znak, svítí červená LED s popisem CHARG a s ní další LED diody podle aktuálního stavu nabíjení)
3. Vybíjení – akumulátory připojené na zátěž (znak “A“, svítí zelená LED dioda s popisem LOAD)



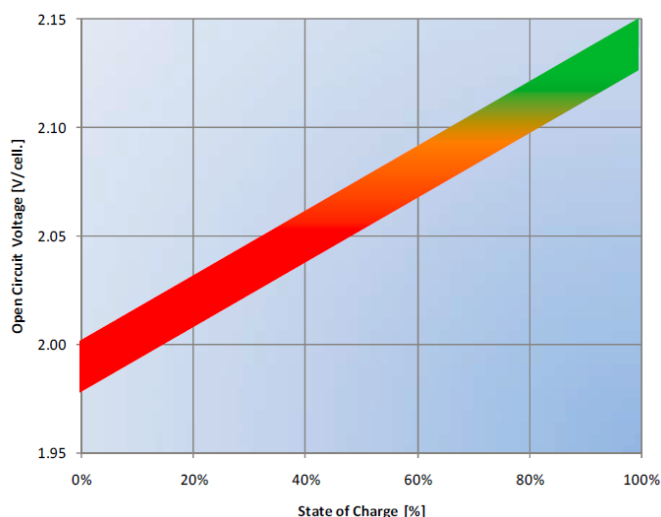
## 4. Měření parametrů a testování olověných akumulátorů

Tato kapitola se zabývá zpracováním naměřených hodnot pro navržené nabíjecí a diagnostické metody. Jako testovaný akumulátor byl použit typ FIAMM 12FGL33 popsáný v kapitole 2.3.1. Dohromady bylo testováno šest akumulátorů. **První sada** akumulátorů s označením **Bat1**, **Bat2**, **Bat3** a **Bat4** byla testována společně v sériovém zapojení jako akumulátorový set. **Druhá sada** akumulátorů obsahuje dva akumulátory s označením **BatA** a **BatB**, které byly testovány jednotlivě. Podle možností dostupných měřicích přístrojů byly sady akumulátorů testované pro různé metody nabíjení a diagnostiky. První sada akumulátorů již byla před těmito testy využívána, a proto jejich historie není definována. Druhá sada akumulátorů nebyla před testováním nikdy použita a její historie je zaznamenávána od prvního použití.

### 4.1 Měření základních parametrů olověných akumulátorů

#### 4.1.1 Samovybíjení akumulátorů

Prvním měřením na olověných akumulátorech bylo změření jejich úrovně samovybíjení, které je popsáno blíže v kapitolách 2.3.2 a 2.3.3. Test byl proveden pro druhou sadu akumulátorů, se kterými nebylo od zakoupení nijak manipulováno. Pro tento test byly přidány další dva akumulátory **BatC** a **BatD**, které byly zakoupeny a skladovány společně s akumulátory ve druhé sadě. V katalogovém listu firmy FIAMM je pro AGM akumulátory definována závislost stavu nabití akumulátoru na ustálené hodnotě svorkového napětí, viz obr. 46. Dále je definována úroveň samovybíjení jako pokles o 2 % kapacity za měsíc při skladovací teplotě 20 °C. [2]



Obr. 46 – Závislost svorkového napětí na stavu nabití akumulátoru [2 (fig. 5)]

Druhá sada akumulátorů byla skladována v klimatizované místnosti při konstantní teplotě 20 °C po dobu 7 měsíců. Za předpokladu, že akumulátory byly při zakoupení plně nabitě, můžeme určit pokles celkové kapacity jako

$$C_{10\_loss} = n_{\text{měsíců}} \cdot \text{samovybití} = 7 \cdot 2 = 14 \% \quad (4.1.1/1)$$

Z grafu závislosti obr. 46 lze definovat přibližnou finální hodnotu svorkového napětí pro 86% stav nabití a výše zmíněné podmínky jako 2,12 V/článek => 12,72 V/akumulátor.

Změřené hodnoty svorkového napětí po skladování akumulátorů 7 měsíců (20 °C) jsou pro jednotlivé akumulátory druhé sady zaznamenány v tabulce 9.

Označení akumulátoru	Hodnota svorkového napětí
BatA	12,679 V
BatB	12,663 V
BatC	12,663 V
BatD	12,672 V

**Tabulka 9 – Naměřené hodnoty samovybíjení olověných akumulátorů**

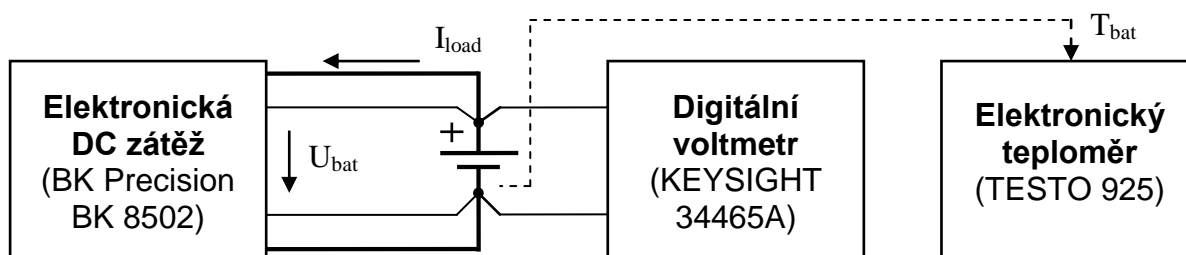
Průměrná hodnota změřených výsledků je rovna 12,669 V, která dle závislosti obr. 46 odpovídá 75% stupni nabití. Rozdíl vypočtené teoretické hodnoty a změřené hodnoty stavu vybití je roven 11 %, což odpovídá samovybíjení po dobu 5,5 měsíců. Pokud by bylo zaručeno, že byl akumulátor před uskladněním plně nabitý, byl by rozdíl způsoben například zvýšenou lokální okolní teplotou uskladněných akumulátorů, případně by mohla být příčinou horší kvalita nově vyrobených akumulátorů. S největší pravděpodobností je však rozdíl způsobený předchozím uskladněním akumulátorů u prodejce.

#### 4.1.2 Měření vybíjecí charakteristiky a celkové kapacity akumulátoru

Aby bylo možné v průběhu testování diagnostických metod akumulátorů vyhodnocovat jejich aktuální životnost, je nutné znát přesnou hodnotu celkové kapacity akumulátoru. Díky tomu je možné porovnávat hodnoty z diagnostických měření a srovnávat je se skutečnou hodnotou. Pro tento účel je nejpřesnějším způsobem použití měření vybíjecí charakteristiky a z té následně určení celkové kapacity akumulátoru, viz kapitola 2.3.1. Pro měření celkové kapacity byl zvolen 2 hodinový vybíjecí test. Jeho parametry pro akumulátory FIAMM 12FGL33 jsou následující [3]

- Doba vybíjení = 2 hodiny
- Vybíjecí proud = 11,7 A
- Finální napětí = 1,67 V/článek => 10,02 V/akumulátor
- Nominální kapacita  $C_2 = 23,4$  Ah pro okolní teplotu 25 °C

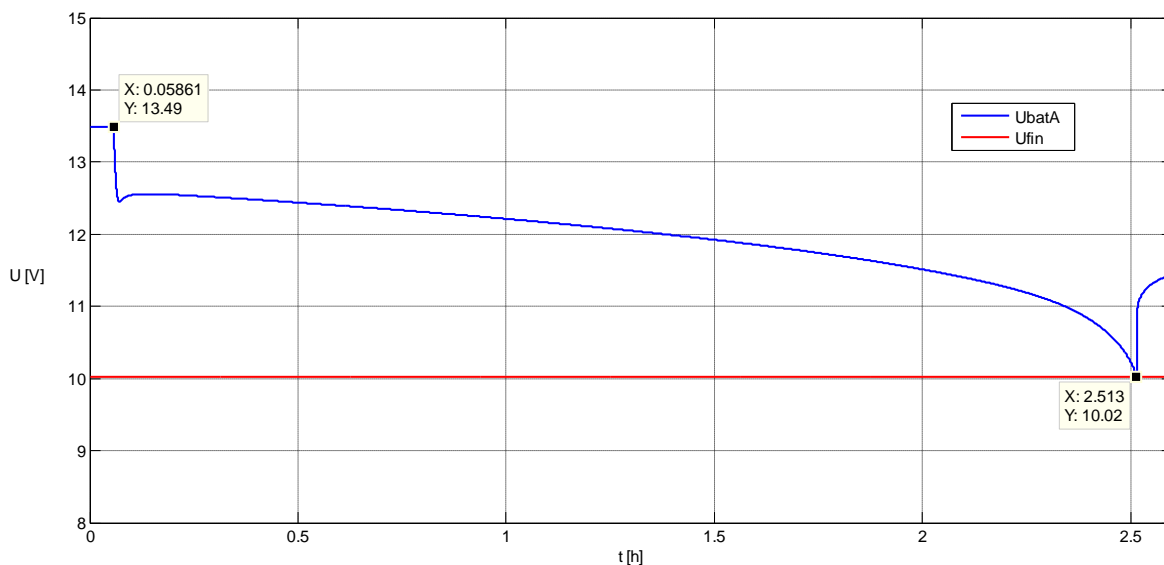
Elektronické zapojení měřicího obvodu je zobrazeno na obr. 47.



**Obr. 47 – Závislost svorkového napětí na stavu nabití akumulátoru**

Pro měření vybíjecí charakteristiky byla použita elektronická zátěž firmy BK Precision typu BK8502, která implementuje funkci pro výpočet celkové kapacity vybité baterie. Pro potlačení chyby měření napětí způsobené úbytkem napětí vybíjecích kabelů, kterými protéká proud 11,7 A, je napětí měřeno čtyřvodičově. Pro záznam průběhu napětí na akumulátoru je použit multimetr KEYSIGHT 34465A a pro měření okolní teploty akumulátoru je použit elektronický teploměr TESTO 925.

Vybíjecí charakteristika plně nabitého olověného akumulátoru FIAMM 12FGL33 **BatA** pro dvouhodinový test je zobrazena na obr. 48. Plné nabití bylo detekováno pomocí udržovacího proudu  $I_{float} = 10,5 \text{ mA}$ . Změřená kapacita  $C_2 = 28,72 \text{ Ah}$ .



**Obr. 48 – Vybíjecí charakteristika akumulátoru BatA FIAMM 12FGL33**

Pro výpočet celkové kapacity akumulátoru z průběhu vybíjecí křivky je nutné odečíst především dobu, po kterou byl akumulátor vybit konstantním proudem, než pokleslo svorkové napětí na hodnotu  $U_{fin} = 10,02 \text{ V}$ . Časový interval je vyznačen pomocí kurzorů v grafu obr. 48. Výpočet celkové kapacity akumulátoru je poté následující

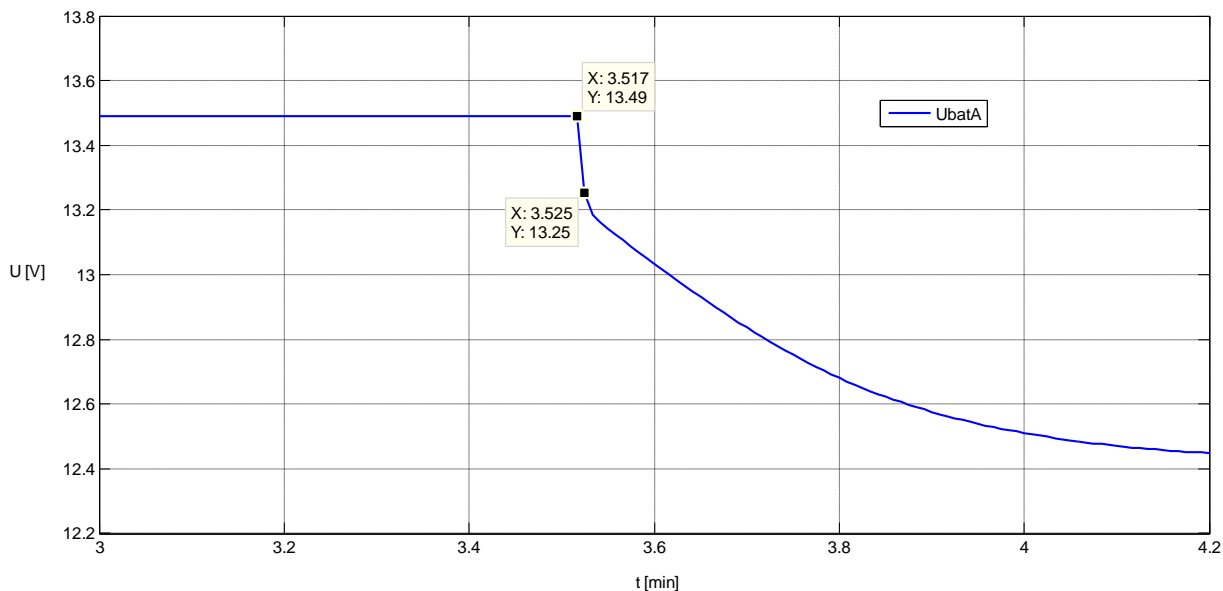
$$C_2 = I_{load} \cdot t_{disch} = 11,7 \cdot (2,513 - 0,05816) \cong 28,72 \text{ Ah} \quad (4.1.2/1)$$

#### 4.1.3 Měření vnitřního odporu akumulátoru

Jak již bylo popsáno v kapitolách 2.2.2 a 2.3.1, vnitřní odpor závisí na stavu vybití akumulátoru, okolní teplotě a je předpokladem, že se mění také s měnící se životností akumulátoru. Pro změření vnitřního odporu je použita zatěžovací metoda. Tato metoda má výhodu ve své jednoduchosti, a je proto jednoduše implementovatelná v diagnostických systémech. Základem je měření úbytku napětí na vnitřním odporu akumulátoru, který je možné následně vypočítat díky znalosti proudu, který jím protéká. Vnitřní odpor akumulátoru způsobuje při proudovém odběru pokles napětí na svorkách akumulátoru, který je zároveň rovný úbytku napětí na vnitřním odporu. Výpočet vnitřního odporu akumulátoru je poté následující

$$R_{int} = \frac{U_0 - U_{I_{load}}}{I_{load}} [\Omega] \quad (4.1.3/1)$$

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, vnitřní odpor je možné změřit pomocí poklesu napětí na akumulátoru při zatížení konstantním proudem. Je proto možné využít stejné měřicí zapojení, jako pro měření vybíjecí charakteristiky, viz obr. 49. Průběh napětí akumulátoru **BatA** v krátkém časovém úseku po zatížení konstantním proudem 11,7 A je zobrazeno na obr. 49.



**Obr. 49 – Průběh napětí při zatížení akumulátoru BatA konstantním proudem**

Z průběhu napětí obr. 49 je možné pomocí vyznačených bodů odečíst pokles napětí bezprostředně po zatížení konstantním proudem 11,7 A následně vypočítat vnitřní odpor

$$R_{int} = \frac{13,49 - 13,25}{11,7} \cong 20,513 \text{ m}\Omega \quad (4.1.3/2)$$

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.4.1, vnitřní odpor není nutné měřit absolutně přesně, nýbrž je důležité, aby byl měřen vždy stejně, neboť je pro diagnostiku potřebný především poměr aktuálního vnitřního odporu na referenční hodnotě změřené při prvním plném nabití akumulátoru v provozu.

## 4.2 Testování nabíjecích a diagnostických metod

### 4.2.1 Obnovení akumulátoru po dlouhém odstavení z provozu

V kapitole 4.1.1 bylo změřeno, jakým způsobem působí samovybíjení na kapacitu olověných akumulátorů. Úroveň samovybíjení je tedy údaj, který je spojen především se snižováním aktuální kapacity akumulátoru, nikoliv však se snižováním celkové kapacity. Pokud je však akumulátor nepoužitý, případně dlouhou dobu nebyl v provozu, může dojít ke ztrátě celkové kapacity z důvodu koroze, případně usazenin oxidu olova na elektrodách, viz kapitola 2.4.1.

Tento jev se projevil u první i druhé sady akumulátorů. Jeho indikátorem byl vysoký udržovací (float) proud, přičemž společnou vlastností první i druhé sady akumulátorů byla absence třístavového nabíjecího cyklu s druhým stavem rovným plynovacímu napětí 14,4 V. Před provedením kroků pro obnovení akumulátorů, byly hodnoty udržovacích proudů u jednotlivých akumulátorů pro teplotu 25 °C rovny viz tabulka 10.

Označení akumulátoru	Hodnota float napětí	Hodnota float proudu	Aktuální doba nabíjení
BatA	13,55 V	22 mA	28 hodin
BatB	13,55 V	28 mA	42 hodin
Bat1	13,58 V	35 mA	3 týdny
Bat2	13,54 V		
Bat3	13,59 V		
Bat4	13,55 V		

**Tabulka 10 – Naměřené hodnoty udržovacího proudu před obnovou akumulátorů**

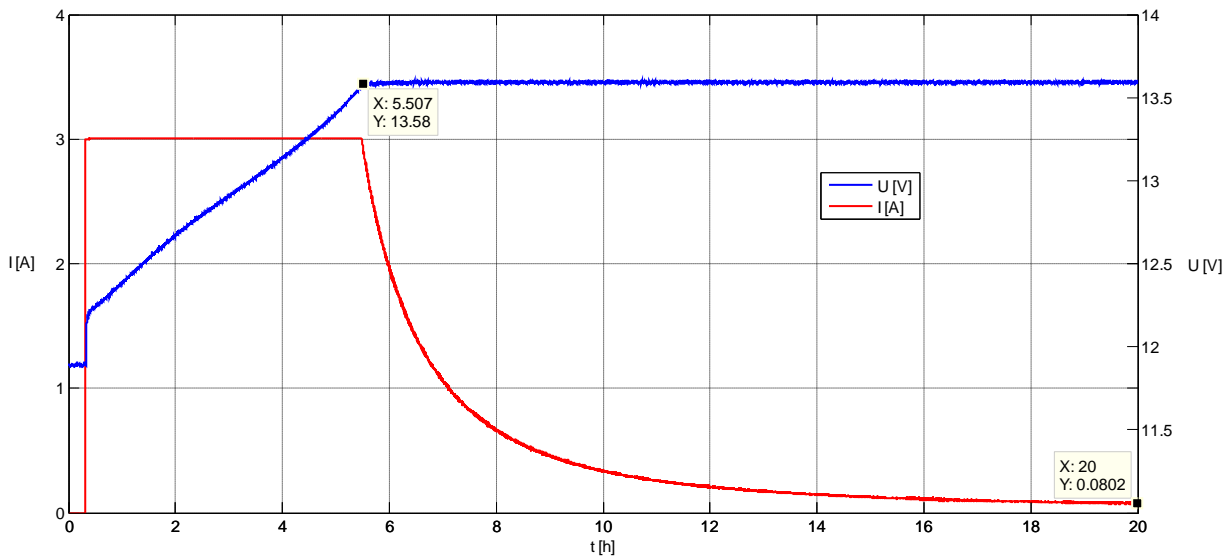
Správná hodnota udržovacího proudu, který by měl podle technické dokumentace odebírat akumulátor při plném nabití, je rovna 10 mA. Z naměřených hodnot v tabulce 10 je patrné, že se tato hodnota u některých akumulátorů liší o více než 300 %. V technické dokumentaci k oloveným AGM akumulátorům FIAMM je uveden postup, díky kterému je možné obnovit kondici akumulátoru. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2.3, jedná se o řízené přebíjení, při kterém se očišťují elektrody od oxidu olova a díky tomu se také srovnávají úrovně napětí mezi jednotlivými články v akumulátoru. [2]

Pro příklad je uveden postup obnovení kondice akumulátoru **BatA**. Při udržovacím proudu uvedeném v tabulce 10, byla pomocí dvouhodinového vybíjecího testu naměřena kapacita  $C_2 = 28,32$  Ah. Po vybíjecím testu byl akumulátor **BatA** připojen na třístavový nabíjecí cyklus, s nabíjecím proudem  $I_{\text{charg}} = 3$  A, napětím v druhé fázi na  $U_{\text{cycle}} = 14,4$  V a s finálním udržovacím napětím 13,55V, odpovídajícím pro okolní teplotu 25 °C. Proud, při kterém došlo k přepnutí na udržovací úroveň napětí, byl roven 250 mA. Druhý stav nabíjecího cyklu trval přibližně 8 hodin. Po ustálení udržovacího proudu po přibližně 10 hodinách byl udržovací proud roven  $I_{\text{float}} = 13,3$  mA. Po změření kapacity dvouhodinovým vybíjecím testem byl výsledek  $C_2 = 28,43$  Ah. Z naměřených hodnot je tedy možné usuzovat, že se díky nabíjecímu cyklu s fází regulace na plynovací napětí, podaří částečně obnovit celkovou kapacitu oloveného akumulátoru. Pro plné obnovení je nutné provést více cyklů, které jsou nazývány formovací částí životního cyklu oloveného akumulátoru. [2]

#### 4.2.2 Měření dvoustavového nabíjecího cyklu

V kapitole 2.2.3 jsou popsány jednotlivé nabíjecí cykly, které se používají pro olovené akumulátory. Jedním z nich je dvoustavový nabíjecí cyklus, který se skládá z režimu konstantního proudu a konstantního napětí. Pro účely nabíjení v zálohovacím systému se tento nabíjecí cyklus využívá s hodnotou udržovacího napětí. Jeho použití je vhodné pro dobití akumulátoru, jehož hloubka vybití nepřesáhla 10 %. Není tedy využíváno plynovacího napětí, jehož nadměrné používání vede ke snížení celkové kapacity. Pro vyšší hloubky vybití je však tento algoritmus pomalý a nestihl by dobýt akumulátor do požadovaných 20 hodin. Ukázka průběhu nabíjení akumulátoru **BatA** dvoustavovým cyklem je zobrazena na obr. 50.

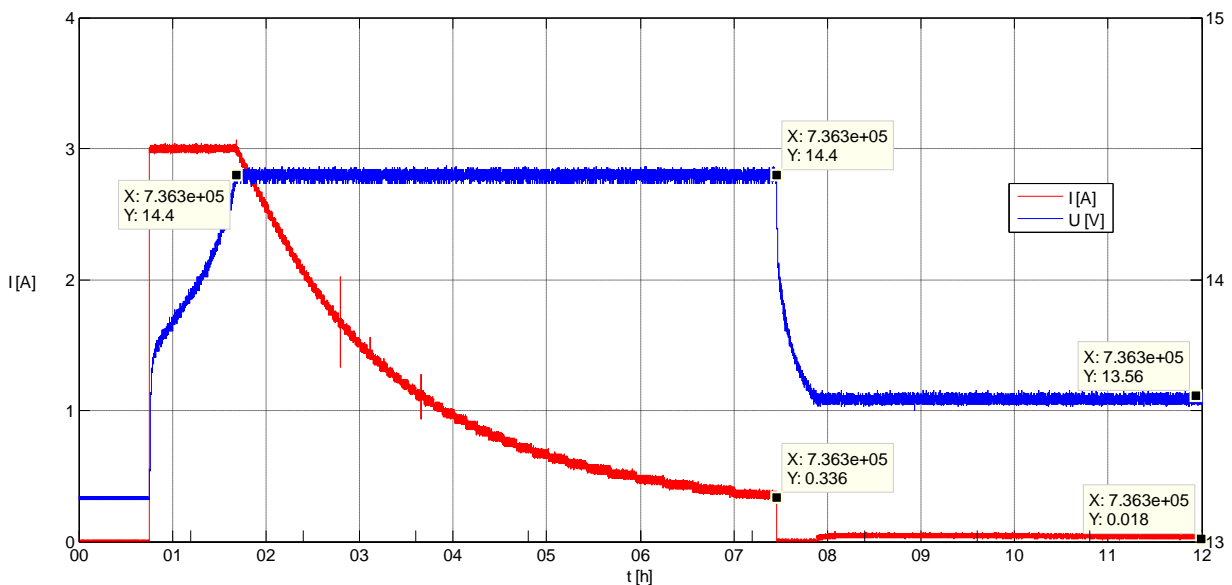
Z průběhu proudu je patrné, že i po 20 hodinách nabíjení je udržovací proud stále roven 80,2 mA.



Obr. 50 – Průběh dvoustavového nabíjecího cyklu

#### 4.2.3 Měření třístavového nabíjecího cyklu

Nejvíce používanou metodou nabíjení je pomocí třístavového algoritmu. Jak je již v kapitole 2.2.3 popsáno, skládá se ze tří fází, a to konstantního proudu, konstantního plynovacího napětí a konstantního udržovacího napětí. Hlavní výhodou této metody nabíjení je její rychlost. Nevýhodou je nutnost omezeného použití, neboť ve druhé fázi plynování akumulátoru dochází ke ztrátě elektrolytu a tím k pozvolnému poklesu celkové kapacity. Na obr. 51 je znázorněn průběh třístavového nabíjecího cyklu akumulátoru **BatB** po 100% vybití. Při srovnání s dvoustavovým nabíjecím cyklem obr. 50 je zřejmá výrazně kratší doba nabití akumulátoru. V obr. 51 jsou údaje z kurzorů relevantní pouze pro osu Y.



Obr. 51 – Průběh třístavového nabíjecího cyklu

#### 4.2.4 Testování diagnostických metod

Pro základní ověření diagnostických metod navržených v kapitole 2.3.1, byl pro názornost použit vybíjecí test první sady akumulátorů, tedy vybíjecí test čtyř olovených akumulátorů v sérii. Diagnostikování stavu akumulátorového setu pomocí vybíjecího testu je výhodné především z důvodu možnosti měření hned několika důležitých parametrů, které je pro diagnostiku možné využít.

Prvním parametrem je vnitřní odpor jednotlivého akumulátoru, který je změřen díky prvotnímu zatížení akumulátorového setu. Druhým parametrem je změření celkové kapacity akumulátorového setu a možnost odhadu kapacity jednotlivého akumulátoru. Nejdůležitějším diagnostickým parametrem při vybíjecím testu akumulátorového setu je rozdíl průběhů napětí akumulátorů zapojených v sérii. Díky možnosti měření těchto parametrů je možné odhadovat, jaká je přibližná kondice každého použitého akumulátoru.

Vybíjecí test byl realizován pomocí odporové zátěže  $R_{load} = 5,9 \Omega$  při počáteční okolní teplotě  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Finální napětí akumulátorového setu bylo stanoveno na  $U_{fin} = 4 * 10,5 = 42 \text{ V}$ . Akumulátory byly před testem nabíjeny udržovacím napětím  $U_{float} = 4 * 13,545 = 54,18 \text{ V}$ , kdy úrovně napětí na jednotlivých akumulátorech byly následující:

- $U_{bat1\_init} = 13,58 \text{ V}$
- $U_{bat2\_init} = 13,56 \text{ V}$
- $U_{bat3\_init} = 13,525 \text{ V}$
- $U_{bat4\_init} = 13,47 \text{ V}$

Již z těchto rozdílů napětí mezi jednotlivými akumulátory při udržovacím napětím můžeme usuzovat, že akumulátory Bat1 a Bat2 budou mít lepší vlastnosti, než akumulátory Bat3 a Bat4, které jsou díky zhoršeným vnitřním parametrům podbíjeny.

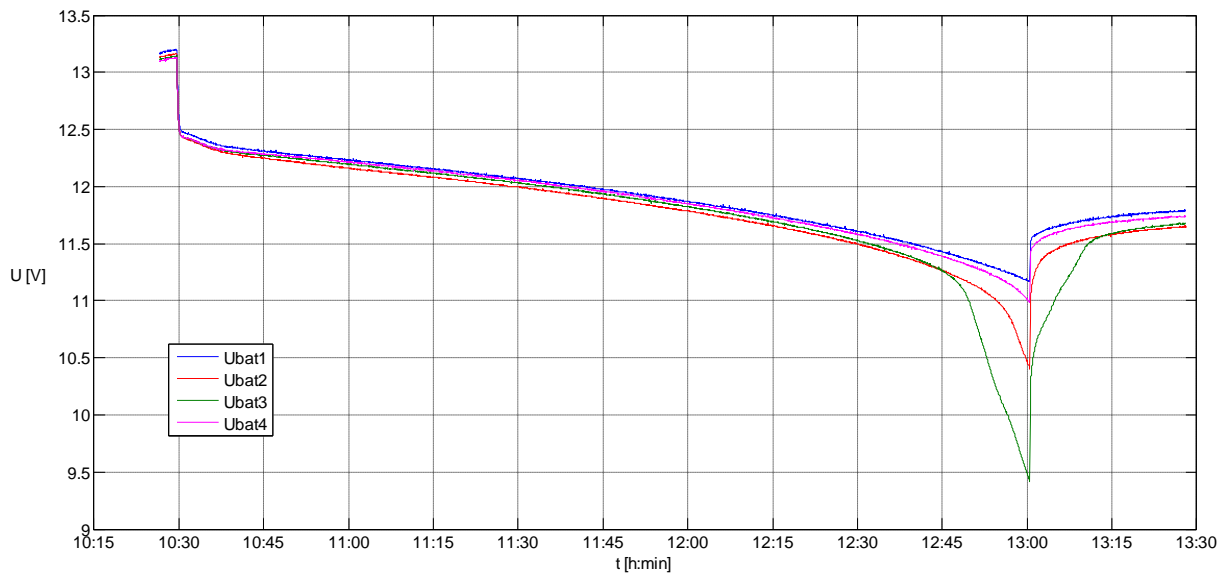
Před plným nabitím akumulátorů byla dvouhodinovým vybíjecím testem změřena celková kapacita  $C_2$  každého akumulátoru zvlášť. Výsledky byly rovny:

- $C_{2\_bat1} = 24,69 \text{ Ah}$
- $C_{2\_bat2} = 23,42 \text{ Ah}$
- $C_{2\_bat3} = 23,36 \text{ Ah}$
- $C_{2\_bat4} = 24,49 \text{ Ah}$

Již při srovnání těchto výsledků s hodnotami napětí jednotlivých akumulátorů při nabíjení je patrné, že se akumulátor Bat3 s nejnižší naměřenou celkovou kapacitou  $C_2$  v akumulátorovém setu projevuje nižším napětím, z čehož je možné určit prvotní náznak jeho zhoršené kondice.

Po odpojení akumulátorového setu od udržovacího nabíjecího zdroje byl připojen zatěžovací odpor a byla změřena doba, za kterou od okamžiku připojení zátěže kleslo napětí akumulátorového setu na finální napětí. Celková kapacita akumulátorového setu pak byla vypočtena pro průměrný vybíjecí proud  $8,4 \text{ A}$ . Výsledkem je kapacita přibližně  $18 \text{ Ah}$ . Při nahlédnutí do technického listu [3] by při tomto proudu měla být celková kapacita přibližně rovna  $25,2 \text{ Ah}$ . Je tedy patrné, že je akumulátorový set nevyvážený a díky tomu je možné diagnostikovat, že minimálně jeden akumulátor v setu má zhoršenou celkovou svou kondici.

Napětí na jednotlivých akumulátorech v akumulátorovém setu je zobrazeno v obr. 52. Zde je patrné, že akumulátor Bat3 má nejhorší vnitřní parametry, a to především celkovou vnitřní kapacitu. Finálního napětí dosáhl akumulátor 3 o přibližně 7 minut dříve, než zbylé akumulátory.



**Obr. 52 – Průběh napětí jednotlivých akumulátorů v setu při vybíjecím testu**



## 5. Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na využití olověných akumulátorů v bezpečnostních a bezúdržbových zálohovacích systémech, především analýze využití olověných akumulátorů v drážních bezpečnostních systémech. V rámci realizace zadání této diplomové práce byl navržen a zrealizován modul olověných akumulátorů, jehož hlavní součástí je nabíjecí zdroj řízený mikroprocesorem STM32F407VG. Modul olověných akumulátorů je navržen tak, aby bylo možné nabíjet jeden až čtyři olověné akumulátory zapojené v sérii pomocí třístavového nabíjecího algoritmu. Dále modul implementuje obvody pro měření napětí na každém akumulátoru v sérii, měření nabíjecího a vybíjecího proudu a měření okolní teploty akumulátorů. Pro modul olověných akumulátorů byla navržena a osazena deska plošných spojů, která byla kompletně zprovozněna. Modul dále implementuje obvod pro spínání odporové zátěže olověných akumulátorů a komunikační rozhraní pro výpis naměřených hodnot a dálkové ovládání modulu.

Pro řídicí mikroprocesor v modulu olověných akumulátorů byl vytvořen program, který ovládá jeho jednotlivé bloky. V programu jsou implementovány regulační smyčky pro řízení konstantního proudu a konstantního napětí na výstupu nabíjecího zdroje. Dále je implementováno zpracování naměřených dat z jednotlivých měřicích bloků, komunikační rozhraní pro výpis naměřených dat a základní ovládání modulu. Především je však v programu implementován stavový automat, který reprezentuje třístavový nabíjecí cyklus olověných akumulátorů, včetně teplotní korekce udržovacího napětí.

Modul olověných akumulátorů byl zrealizován pro možnost ověření nabíjecích a diagnostických metod, které byly v rámci této diplomové práce navrženy pro použití v bezpečnostním bezúdržbovém zálohovacím systému. Práce se zabývá nejen samotným návrhem konceptu bezpečnostního zálohovacího systému, ale také jednotlivými postupy při výběru vhodných olověných akumulátorů, jejich správnému používání a také možnostmi měření jejich kondice. Kapitola 2.4.3 se poté zabývá metodami simulace posunu v životním cyklu akumulátorů (metoda zrychleného stárnutí).

V rámci testování olověných akumulátorů FIAMM 12FGL33 byly provedeny série měření, jejichž cílem bylo reálné ověření možností diagnostiky a nabíjení akumulátorů. V rámci metod nabíjení byly provedeny testy s jedním, dvěma a čtyřmi akumulátory v sérii pro dvoustavový a třístavový nabíjecí cyklus. Bylo otestováno obnovení celkové kapacity dlouhodobě odstaveného akumulátoru pomocí nabíjecích metod. V rámci diagnostických testů byla měřena závislost vnitřního odporu a udržovacího proudu na celkové kapacitě akumulátoru. Bylo také testováno, jakým způsobem se chovají akumulátory zapojené v sérii a jaké jsou možnosti detekce vadného kusu. Pomocí cyklování akumulátorů bylo testováno, jakým způsobem se mění jejich celková kapacita.

Zásadním problémem při realizaci zadání této diplomové práce je časová náročnost jednotlivých testů. Jeden pracovní cyklus testovaného olověného akumulátoru při dvouhodinovém vybíjecím testu a nabíjení třístavovým cyklem, trvá přibližně 24 hodin čistého času. V rámci období pro zpracování této práce nebylo možné provést dostatečný počet pracovních cyklů testovaných akumulátorů, aby došlo k výraznému poklesu celkové kapacity akumulátorů a bylo tak možné korektně ověřit všechny navržené diagnostické metody.

Ve výsledné realizaci zadání této práce jsou také možnosti vylepšení. V rámci návrhu druhé verze modulu olověných akumulátorů je plánováno jako hlavní vylepšení implementace

elektronické zátěže, díky které by mohl modul olověných akumulátorů provádět kompletní vybíjecí testy. Další možností vylepšení je realizace podrobného uživatelského rozhraní pomocí sériové linky, díky kterému by bylo možné nastavovat parametry nabíjecího cyklu bez nutnosti přehrání programu v mikroprocesoru.

Výsledky této práce mohou být využity při vývoji jakéhokoliv zařízení, ve kterém jsou použity olověné akumulátory. Dále je možné využít jednotlivá řešení modulu olověných akumulátorů, například pro návrh konstantního zdroje proudu, případně konstantního zdroje napětí.

Všechny cíle práce, které byly stanoveny v úvodu, se podařilo splnit.

## Seznam ilustrací

Obr. 1 – Principiální zapojení sériové topologie zálohovacího systému.....	4
Obr. 2 – Principiální zapojení sériové topologie zálohovacího systému.....	4
Obr. 3 – Principiální vnitřní zapojení SSR s Mosfet tranzistory [29] .....	5
Obr. 4 – Principiální zapojení kombinované topologie zálohovacího systému .....	6
Obr. 5 – Principiální blokové schéma elektroniky železničního přejezdu .....	8
Obr. 6 – Klasický (údržbový) olověný akumulátor Victron OPzS Solar 910 [15] .....	10
Obr. 7 – Ukázka nového a poškozeného SLA akumulátoru [18], [19] .....	11
Obr. 7 – Ukázka VRLA akumulátoru FIAMM 12FGL33 [20].....	11
Obr. 8 – Vnitřní struktura AGM akumulátoru [22].....	12
Obr. 9 – Vnitřní struktura gelového akumulátoru [23].....	13
Obr. 10 – Akumulátor s technologií Lead Crystal <sup>®</sup> 6-CNJF-22 [25].....	14
Obr. 11 – Graf závislosti kapacity olověného akumulátoru na vybíjecím proudu [2 (fig. 1)] .	16
Obr. 12 – Graf závislosti životnosti olověných akumulátorů na okolní teplotě [2 (fig. 4)] .....	16
Obr. 13 – Graf závislosti celkové kapacity olověných akumulátorů na okolní teplotě [2 (fig. 3)] .....	17
Obr. 14 – Graf závislosti vnitřního odporu akumulátoru na hloubce vybití [30 (fig. 11)].....	18
Obr. 15 – Nabíjecí cyklus konstantním proudem (napětí, proud) [5 (fig. 51)] .....	20
Obr. 16 – Průběh dvoustavového nabíjecího cyklu (napětí, proud) [5 (fig. 48)] .....	21
Obr. 17 – Průběh třístavového nabíjecího cyklu (napětí, proud) [5 (fig. 49)].....	21
Obr. 18 – Závislost udržovacího (float) napětí na okolní teplotě akumulátoru [2 (fig. 6)].....	22
Obr. 19 – Vnitřní model olověného akumulátoru se soustředěnými parametry [31] .....	24
Obr. 20 – Závislost vnitřního odporu akumulátoru na jeho celkové kapacitě [31 (fig. 12)]....	25
Obr. 21 – Závislost celkové kapacity akumulátoru na počtu pracovních cyklů [30 (fig. 12)].	29
Obr. 22 – Závislost celkové kapacity akumulátoru na počtu cyklů s hlubokým vybitím [30, Fig. 14] .....	30
Obr. 23 – Obecné blokové schéma modulu olověných akumulátorů.....	33
Obr. 24 – Podrobné blokové schéma modulu olověných akumulátorů.....	34
3.2 Návrh obvodu pro měření proudu .....	35
Obr. 25 – Schéma obvodu měření proudu s jedním snímacím odporem .....	36
Obr. 26 – Schéma zapojení obvodu s precizní napěťovou referencí LM4140ACM-1.0 .....	39
Obr. 27 – Šumový model obvodu měření vybíjecího a nabíjecího proudu.....	42
Obr. 28. – Zjednodušený šumový model obvodu měření vybíjecího a nabíjecího proudu.....	43
Obr. 30 – Původní návrh měření napětí jednotlivých akumulátorů v akumulátorovém setu ...	49
Obr. 31 – Konečný návrh měření napětí jednotlivých akumulátorů .....	50
Obr. 32 – Původní návrh měření napětí jednotlivých akumulátorů v akumulátorovém setu ...	51
Obr. 33 – Zapojení pro úpravu výstupního rozlišení obvodu měření napětí.....	53

Obr. 34 – Zapojení napěťové reference REF3318AIDB .....	53
Obr. 35 – Obvod měření teploty olověných akumulátorů .....	55
Obr. 36 – Zapojení napěťové reference REF3312AIDB .....	55
Obr. 37 – Senzor teploty LM35CZ .....	56
Obr. 38 – Návrh obvodu nabíjecího zdroje .....	57
Obr. 39 – Principiální zapojení pro sepnutý budič v nabíjecím zdroji .....	59
Obr. 40 – Principiální zapojení pro sepnutý budič v nabíjecím zdroji .....	60
Obr. 41 – Regulační smyčka konstantního zdroje napětí .....	61
Obr. 42 – Regulační smyčka konstantního zdroje proudu .....	61
Obr. 43 – Návrh obvodu pro spínání zátěže k olověným akumulátorům .....	62
Obr. 44 – Zapojení lineárního stabilizátoru MIC37100_3_3 .....	63
Obr. 45 – Testovací modul olověných akumulátorů .....	64
Obr. 46 – Závislost svorkového napětí na stavu nabití akumulátoru [2 (fig. 5)] .....	65
Obr. 47 – Závislost svorkového napětí na stavu nabití akumulátoru .....	66
Obr. 49 – Průběh napětí při zatížení akumulátoru BatA konstantním proudem .....	68
Obr. 50 – Průběh dvoustavového nabíjecího cyklu .....	70
Obr. 51 – Průběh třístavového nabíjecího cyklu .....	70
Obr. 52 – Průběh napětí jednotlivých akumulátorů v setu při vybíjecím testu .....	72

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – První návrh parametrů zálohovacího systému.....	2
Tabulka 2 – Souhrn parametrů modulu olověných akumulátorů .....	32
Tabulka 3 – Souhrn požadavků pro obvody měření proudu .....	35
Tabulka 4 – Souhrn požadavků pro obvody měření napětí.....	48
Tabulka 5 – Souhrn požadavků pro obvod měření teploty.....	54
Tabulka 6 – Souhrn základních parametrů senzoru LM35CZ .....	54
Tabulka 7 – Souhrn základních parametrů nabíjecího zdroje .....	56
Tabulka 8 – Výpis využitých periférií mikroprocesoru STM32F407VG .....	63
Tabulka 10 – Naměřené hodnoty udržovacího proudu před obnovou akumulátorů .....	69

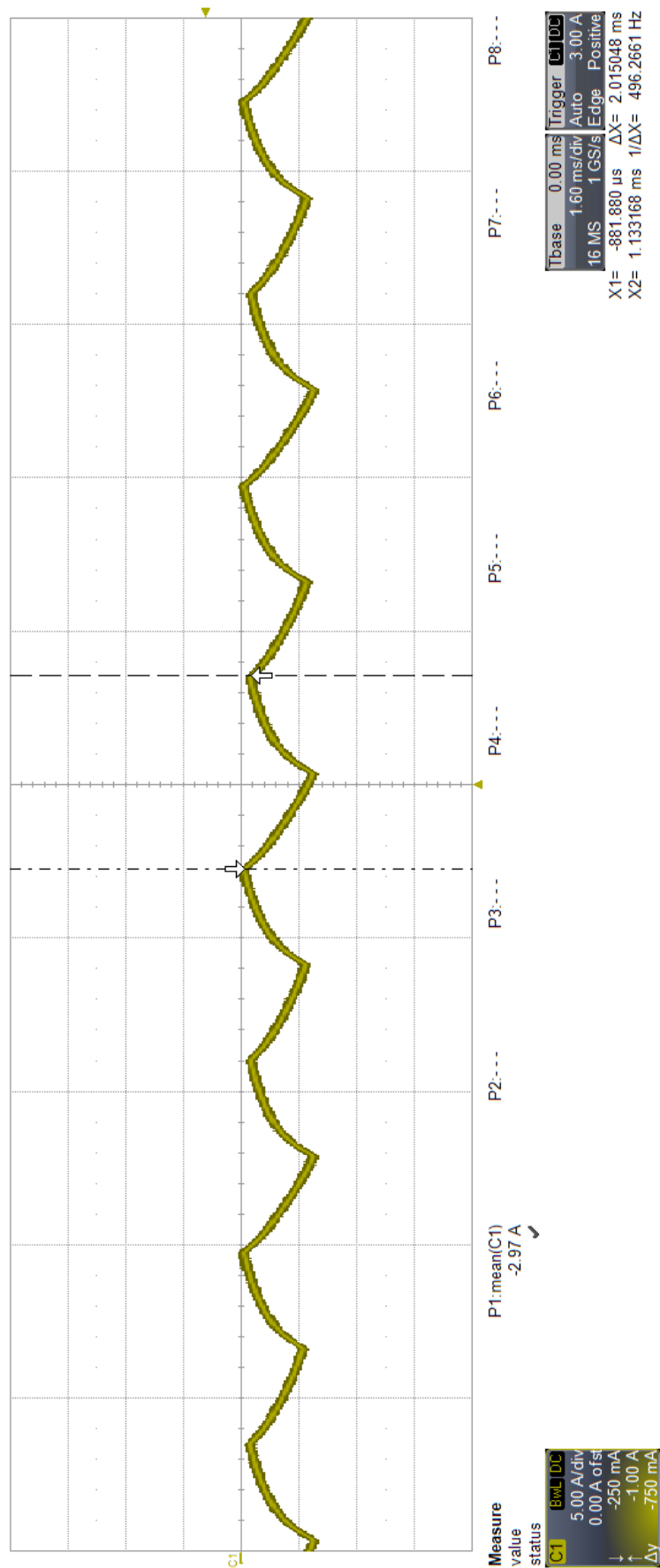
## Reference

- [1] MARCONI, *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: Aneb letem světem startovacích akumulátorů* [online], 2008, příručka
- [2] FIAMM, *I&O – EMEA AGM – March 2012*, online, 2012, Instructions & Technical Manual, Edition 01/2012-EMEA
- [3] FIAMM, *FGL\_EMEA-SA\_2015\_07\_15*, online, 2015, technický list
- [4] Sonnenschein, *Gel-Handbook, Part 2*, online, 2012, Handbook for Stationary Gel-VRLA Batteries
- [5] Sonnenschein, *Handbook (part 1)*, online, 2012, Handbook for Stationary Lead-Acid Batteries, Edition 6
- [6] Ing. Tomáš Cetl, *Aplikace elektrochemických zdrojů*, Vydavatelství ČVUT, 2004, ISBN 80-01-02859-3
- [7] Kolektiv aut., *Akumulátory od principu k praxi*, FCC Public, 2003, ISBN 80-86534-03-0
- [8] Yiu, J., *Definitive Guide to ARM9 CortexR-M3 and CortexR-M4 Processors*
- [9] STMicroelectronics, *RM0090 Reference manual*, online, 2015
- [10] NEC Corporation, *U17173EE2V0AN00 Battery Charging with KSeries Microcontroller*, online, 2006
- [11] Linear Technology, Tim Regan, Jon Munson, Greg Zimmer, Michael Sokowski, *AN105FA Current Sense CircuitCollection (Making Sense of Current)*, online, 2005, Application Note 105
- [12] Online, [http://batteryuniversity.com/learn/article/absorbent\\_glass\\_mat\\_agm](http://batteryuniversity.com/learn/article/absorbent_glass_mat_agm)
- [13] Online, <https://www.batterystuff.com/kb/articles/battery-articles/gel-vs-agm.html>
- [14] Online, [https://en.wikipedia.org/wiki/Gaston\\_Planté](https://en.wikipedia.org/wiki/Gaston_Planté)
- [15] Online, <https://www.victronenergy.cz/batteries/opzs-batteries>
- [16] doc. Hammerbauer J., *Olověné akumulátory*, ZČU – FEL, Plzeň, 2011
- [17] Online, <http://slabatteries.blogspot.cz/2013/04/difference-between-flooded-and-vrla.html>
- [18] Převzatý obrázek, online, <http://www.powerstridebattery.com/sealed-lead-acid-batteries/12-volt-4-5-ah-sla-battery-ub1245>

- [19] Přebzatý obrázek, online, <http://www.zbattery.com/Overcharging-SLA-Batteries>
- [20] Přebzatý obrázek, online,  
[www.aku-bat.cz/shopy/akumulatory.eshopza100.cz/zbozi/3050/1413885293.jpg](http://www.aku-bat.cz/shopy/akumulatory.eshopza100.cz/zbozi/3050/1413885293.jpg)
- [21] Online, <http://www.elmarco.cz/aplikace/bateriove-separatory>
- [22] Přebzatý obrázek, online,  
[http://www.exide.com/Media/images/HD\\_AGM\\_cutaway%20Small.jpg](http://www.exide.com/Media/images/HD_AGM_cutaway%20Small.jpg)
- [23] Přebzatý obrázek, online,  
<http://www.intercel.eu/media/gel-battery-construction.jpg>
- [24] Online, <http://leadcrystalbatteries.com/technology-lead-crystal-batteries/lead-crystal-technology-details/>
- [25] Přebzatý obrázek, online,  
<http://leadcrystalbatteries.com/media/wysiwyg/Productpics/Battery12V/6-CNFJ-22.JPG>
- [26] Crydom Company, Bishop, A., *Solid-State Relay Handbook with Applications*, 1986, ISBN 0-672-22475-5, 224s
- [27] Crydom Company, *Series 1 240 VAC datasheet*, online
- [28] Přebzatý obrázek, Crydom Company, *G3VM MOS FET Relays*, obrázek 3, str. 60
- [29] FIAMM-GS, *Technical Handbook Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*
- [30] Sonnenschein, *Handbook for Stationary AGM-VRLA Batteries, Part 2: Installation, Commissioning and Operation*, 2012, AGM-Handbook
- [31] Emerson, Shore P., *EN310TRA-BatOpt/0113 Battery Optimatization Services*, 2012, AGM-Handbook
- [32] Linear Technology, Rich A., *dn15f\_conv*, 1988, Design Note 15
- [33] Linear Technology, *LT 0108 REV D*, 2000, datasheet LTC2051
- [34] Texas Instruments, *SNIS159F*, 1999, datasheet LM35, rev. 2016

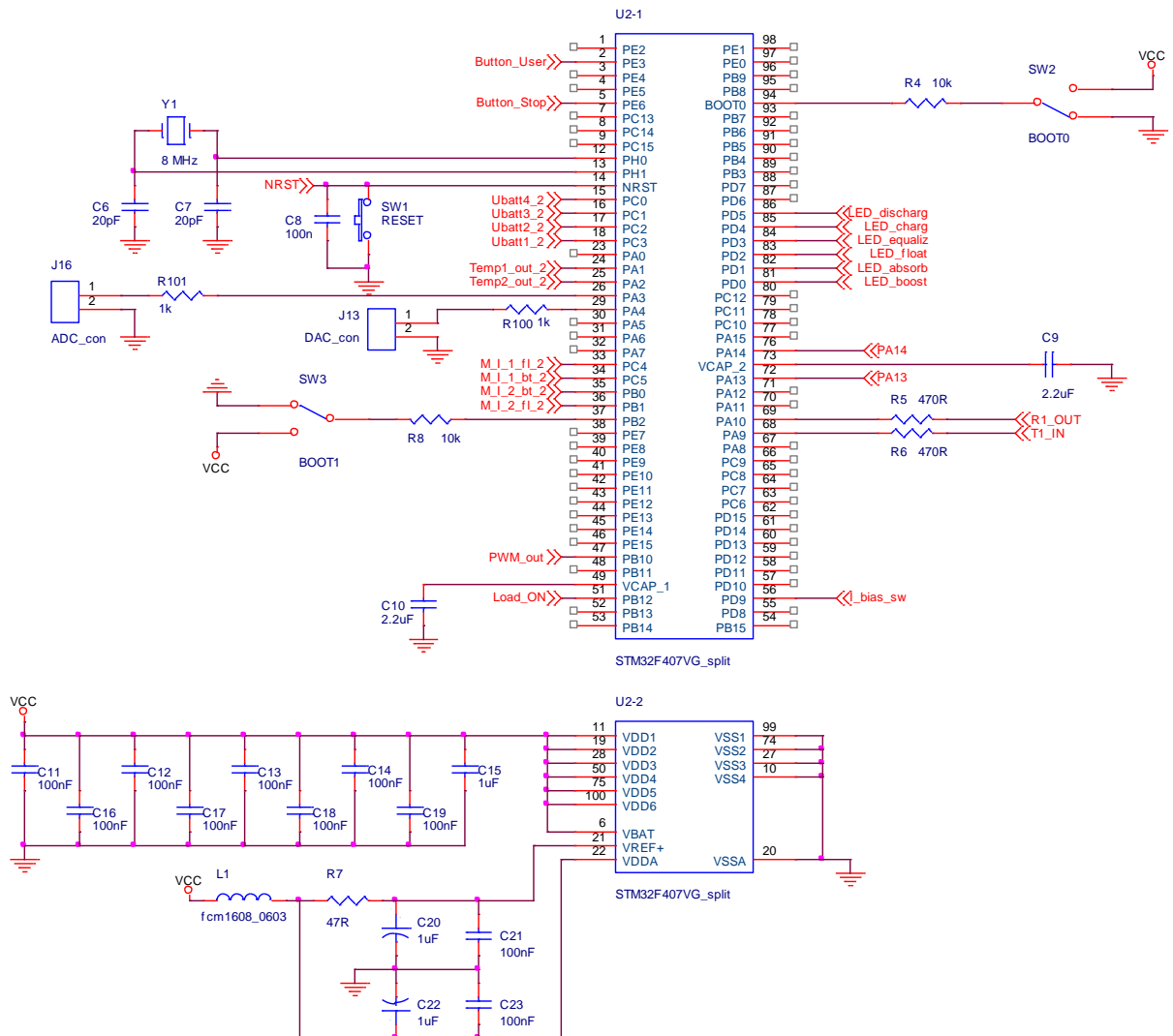
# Přílohy

## 1. Průběh výstupního proudu při chybovém stavu nabíjecího zdroje





## 2. Schéma zapojení digitálního jádra testovacího modulu olověných akumulátorů



### 3. Porovnání jednotlivých technologií olověných akumulátorů

Typ baterie	Lead-Acid AGM	Lead-Acid GEL	Lead Crystal
Model	12FGL33	A412/12 SR	6-CNFJ-22
Kapacita [Ah]	33	12	22
Rozměry [l x w x h mm]	196 x 130 x 159	181 x 76 x 152	181 x 76 x 170
Životnost [roky]	20°C = 10, 40°C = 2,5	20°C = 10, 40°C = 2,5	20°C = 13, 40°C = 7,5
$I_{\text{dis}}$ [A] pro $U_{\text{cell}} = 1.67 \text{ V}$ (3h)	8,40	2,92	6,19
Rozsah pracovních teplot [°C]	-20 ÷ 50	0 ÷ 45	-40 ÷ 60
Váha [kg]	12	5,6	6,9
Ah/kg	2,75	2,14	3,19
Ah/dm <sup>3</sup>	8,15	5,74	9,41
Cena (pro-akkus – akkushop - rs-online)	2390 Kč	2889 Kč	3423 Kč