



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SROVNÁNÍ INTEGROVANÝCH OBVODŮ PRO SPRÁVU JEDNOČLÁNKOVÝCH LI-ION BATERIÍ

COMPARISON OF INTEGRATED CIRCUITS FOR MANAGEMENT OF SINGLE CELL LI-ION BATTERY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štěpán Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Kunz, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Štěpán Novák

ID: 230145

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Srovnání integrovaných obvodů pro správu jednočlánkových Li-ion baterií

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je srovnání různých obvodů, které umí současně nabíjet, měřit kapacitu a chránit jednočlánkové Li-ion baterie velikosti 18650. Zadáání práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Proveďte literární průzkum integrovaných obvodů, popište jejich funkce a možnosti.
2. Vyberte vhodné zástupce, oživte je a napište pro ně jednoduchý obslužný SW.
3. Proměřte jejich parametry a zjistěte přesnosti měření, zejména kapacity baterie pro různé odběrové proudy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

BEARD, K.W. Linden's Handbook of Batteries, Fifth Edition. McGraw-Hill Education, 2019. ISBN 9781260115925.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Jan Kunz, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Lithium iontové baterie jsou v současné době široce využívány jako zdroje energie pro mobilní zařízení, elektromobily, spotřební elektroniku a pro další aplikace. Pro správnou funkci a prodloužení životnosti Li-ion baterií je důležité, aby byly dodrženy parametry dané výrobcem. To se zabezpečuje pomocí vhodných obvodů, na jejichž přesnost udávaných parametrů se zaměřuje tato práce. Práce poskytuje přehled a srovnání různých typů obvodů pro správu a nabíjení Li-ion baterií a vysvětluje základní principy jejich fungování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Li-ion baterie, IO pro správu baterií, ověření přesnosti měření, měření účinnosti

ABSTRACT

Lithium-ion batteries are now widely used as power sources for mobile devices, electric vehicles, consumer electronics and other applications. For proper operation and extended service life of Li-ion batteries, it is important that the parameters specified by the manufacturer are met. This is ensured by means of appropriate circuits, the accuracy of which is the focus of this paper. This work provides an overview and comparison of different types of circuits for Li-ion battery management and charging and explains the basic principles of their operation.

KEYWORDS

Li-ion batteries, battery management IC, measurement accuracy verification, efficiency measurement

NOVÁK, Štěpán. *Srovnání integrovaných obvodů pro baterii 18650*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 78 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jan Kunz, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Štěpán Novák
VUT ID autora: 230145
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Srovnání integrovaných obvodů pro baterii 18650

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Kunzovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Lithium iontové baterie	13
1.1 Jednočláňkové baterie typu 18650	14
1.2 Metody měření kapacity baterií	16
1.2.1 Počítání náboje	17
1.3 Rychlost nabíjení a vybíjení baterie	18
1.4 Nabíjení baterie metodou CC-CV	18
1.4.1 Konstantní proud	19
1.4.2 Konstantní napětí	19
2 Obvody pro správu baterií	20
2.1 Základní obvody pro správu baterií	20
2.2 Pokročilé obvody pro správu baterií	22
3 Kritéria výběru integrovaných obvodů	23
4 Vybrané integrované obvody pro správu baterií	26
4.1 Vybrané základní obvody pro správu baterií	26
4.1.1 Výběr ze skupiny základních IO pro správu baterií	27
4.2 Vybrané pokročilé obvody pro správu baterií	27
4.3 Shrnutí vybraných IO	29
4.3.1 Desky plošných spojů	29
4.3.2 Integrované ochrany IO	31
5 Mikroprocesor a sběrnice	32
5.1 Parametry mikroprocesoru	32
5.2 Komunikační sběrnice	32
5.2.1 Sběrnice I2C	32
5.2.2 Jednovodičová komunikace 1-Wire	34
6 Oživení obvodů	35
6.1 Software MAX17330 EV Kit Software	35
6.2 STM32 Nucleo	36
6.3 BQ25169	36

7	Měření	37
7.1	Tolerance IO	37
7.2	Vybraná měření	37
7.2.1	Zapojení	38
7.2.2	Postup měření	39
7.2.3	Proudová omezení	39
7.2.4	Minimalizace přechodových odporů	40
7.3	Použité přístroje	41
7.4	LabView	41
7.5	Perioda měření	44
7.6	Specifika měření vybraných IO	45
8	Zpracování naměřených dat	47
8.1	Řešení pomocí programu Matlab	47
8.2	Převod hodnot	47
8.3	Nejistoty	48
8.4	Účinnost IO	50
9	Výsledky měření	51
10	Srovnání integrovaných obvodů	59
10.1	Přesnost nabíjecího napětí	59
10.2	Vybíjecí charakteristika	60
10.3	Ochrana napětí baterie	60
10.4	Účinnost	61
10.5	Přesnost stanovení kapacity	61
	Závěr	63
	Literatura	65
	Seznam symbolů a zkratk	68
	Seznam příloh	69
A	Snímek obrazovky osciloskopu	70
B	Naměřená data	71
C	Obsah elektronické přílohy	78

Seznam obrázků

1.1	Li-ion baterie typu 18650 převzato z [4]	14
1.2	Měření úrovně nabití Li-ion článků převzato z [6]	16
1.3	Coulomb counting převzato z [7]	17
1.4	Typický nabíjecí cyklus, metoda CC-CV převzato z [9]	18
2.1	Typické aplikační schéma základního IO převzato z [10]	21
4.1	Náhled testovací desky BQ25619	29
4.2	Schéma testovací desky BQ25619	30
5.1	Průběh komunikace na sběrnici I2C převzato z[16]	33
5.2	Průběh komunikace One wire převzato z[13]	34
6.1	Ukázka registrů z programu MAX17330	35
6.2	Načtené registry BQ25619	36
7.1	Blokové schéma zapojení	38
7.2	DPS k minimalizaci parazitních odporů	40
7.3	Blokové schéma stavového diagramu	42
9.1	Typický nabíjecí cyklus, metoda CC-CV převzato z [9]	51
9.2	Nabíjecí charakteristika IO TP4056	52
9.3	Závislost účinnosti na čase IO TP4056	53
9.4	Nabíjecí charakteristika IO MAX17330	54
9.5	Závislost účinnosti na čase IO MAX17330	55
9.6	Nabíjecí charakteristika IO STBC02	56
9.7	Závislost účinnosti na čase IO STBC02	57
9.8	Vybíjecí charakteristika IO BQ25619	58
A.1	1-Wire, implementovaný bitstream	70
B.1	Nabíjecí charakteristika 100mA, IO TP4056	71
B.2	Nabíjecí charakteristika 780mA, IO TP4056	71
B.3	Vybíjecí charakteristika a reakce ochrany 100mA, IO TP4056	72
B.4	Vybíjecí charakteristika a reakce ochrany 1A, IO TP4056	72
B.5	Vybíjecí charakteristika a reakce ochrany 2,5A, IO TP4056	73
B.6	Nabíjecí charakteristika 100mA, IO MAX17330	73
B.7	Nabíjecí charakteristika 500mA, IO MAX17330	74
B.8	Nabíjecí charakteristika offset, IO MAX17330	74
B.9	Vybíjecí charakteristika 500mA, IO MAX17330	75
B.10	Vybíjecí charakteristika 1A, IO MAX17330	75
B.11	Vybíjecí charakteristika 3A, IO MAX17330	76
B.12	Nabíjecí charakteristika 100mA, IO STBC02	76

B.13 Vybíjecí charakteristika, IO STBC02	77
--	----

Seznam tabulek

1.1	Výhody a nevýhody Li-ion baterie převzato z [2]	13
1.2	Parametry baterie převzato z [5]	15
3.1	Tabulka vybraných obvodů a jejich parametrů	25
4.1	Přehled ochranných prvků jednotlivých obvodů	31
7.1	Přehled tolerancí pro nabíjení udávaný výrobcí	37
7.2	Tabulka měření	37
7.3	Proudová omezení	39
7.4	Tabulka period měření pro různé proudy	44
7.5	Tabulka nabíjecího proudu pro různé hodnoty rezistoru převzato z [19]	45
8.1	Tabulka přepočtu hodnot získaných z registrů převzato z [7]	47

Úvod

Lithium iontové baterie jsou v současné době široce využívány jako zdroje energie pro mobilní zařízení, elektromobily, spotřební elektroniku a pro další aplikace. Pro správnou funkci a prodloužení životnosti Li-ion baterií je důležité, aby byly dodrženy parametry dané výrobcem. To se zabezpečuje pomocí vhodných obvodů, na jejichž přesnost udávaných parametrů se zaměřuje tato práce. Práce poskytuje přehled a srovnání různých typů obvodů pro správu a nabíjení Li-ion baterií a vysvětluje základní principy fungování těchto obvodů. Cílem práce je poskytnout pohled na problematiku obvodů pro správu a nabíjení Li-ion baterií, ověřit jejich parametry a pomoci při výběru nejvhodnějšího řešení.

První část práce se zabývá popisem baterií a průzkumem trhu s obvody. Navazující část definuje kritéria výběru, popisuje jednotlivé čipy a shrnuje vybrané integrované obvody. Následuje část oživení a měření samotných chipů a zpracování naměřených dat. Poslední část se věnuje srovnání naměřených dat s údaji výrobců a porovnání integrovaných obvodů mezi sebou.

1 Lithium iontové baterie

Li-ion (Lithium iontové baterie) vyžívají redukci iontů lithia k ukládání energie. Jedná se o převládající typ baterie používaný ve spotřební elektronice a elektromobilech[1]. Tento termín se vztahuje na mnoho různých typů chemických technologií, z nichž každá používá lithium jako zdroj energie. Liší se materiálem katody, elektrolytem, konstrukcí a dalšími fyzikálními vlastnostmi.[2] Tyto baterie se vyrábějí jako cylindrické nebo prizmatické články[3] ¹.

Články můžeme rozdělit do dvou základních kategorií:

- primární, tedy jednorázové
- sekundární s možností opakovaného dobíjení

Termín „baterie“ se používá jako obecné označení pro články skladující energii. V práci tento termín používám jako označení sekundárního článku.

Výhody a nevýhody tohoto typu baterie jsou shrnuty v tabulce č. 1.1

Advantages	Disadvantages
Sealed, maintenance-free cells	Moderate initial cost
Long cycle life	Degrade at high temperature
Broad temperature range of operation	Need for protective circuitry
Long shelf life	Capacity loss and potential for thermal runaway when overcharged
Low self-discharge rate	Possible venting and possible thermal runaway when crushed
Rapid charge capability	May fail if rapidly charged at low temperatures (<0°C)
High-rate and high-power discharge	
High coulombic and energy efficiency	
High specific energy and energy density	
No memory effect	
Cylindrical, prismatic, and polymer cells offer design flexibility	

Tab. 1.1: Výhody a nevýhody Li-ion baterie převzato z [2]

¹Vyrábí se v mnoha velikostech, obvykle obdélníkového tvaru. Jsou vybaveny tlakovým ventilem. Umožňují dosáhnout vyšší hustotě energie na plochu díky absenci vzduchových mezer.

Mezi nejvýznamnější vlastnosti, které autoři knihy Linden's Handbook of Batteries [2] zmiňují v tabulce č.1.1 dle mého názoru patří:

- Dlouhá životnost
- Degradace při vysokých teplotách
- Potřeba ochranných obvodů
- Možnost rychlého dobíjení
- Nízká míra samovybíjení
- Vysoké vybíjecí proudy
- Absence paměťového efektu

1.1 Jednočládkové baterie typu 18650

Typ 18650 značí rozměry baterie tedy průměr 18 mm a délku 65 mm. Baterie má válcovitý tvar. Díky těmto rozměrům je vhodná pro velkého množství aplikací např. pro přenosná elektronická zařízení (rádia, svítilny, stavební nářadí atd.). Výhodou vůči prizmatickým článkům je unifikovaná velikost, která zajišťuje snadnou výměnu opotřebovaných článků.



Obr. 1.1: Li-ion baterie typu 18650 převzato z [4]

V tabulce č. 1.2 jsou uvedeny základní parametry zapůjčené, komerčně dostupné baterie značky Samsung model ICR18650-30Q. Tyto parametry je nezbytně nutné udržet po celou dobu životnosti baterie, aby nedošlo k jejímu trvalému poškození. Obvody pro správu baterií musí být schopny tyto parametry udržovat ve výrobcem stanovených mezích.

3.0. Nominal specifications

Item	Specification
3.1 Minimum discharge capacity	2,950mAh Charge: 1.50A, 4.20V, CCCV 150mA cut-off, Discharge: 0.2C, 2.5V discharge cut-off
3.2 Nominal voltage	3.6V
3.3 Standard charge	CCCV, 1.50A, 4.20 ± 0.05 V, 150mA cut-off
3.4 Rated charge	CCCV, 4A, 4.20 ± 0.05 V, 100mA cut-off
3.6 Charging time	Standard charge : 180min / 150mA cut-off Rated charge: 70min (at 25 °C) / 100mA cut-off
3.7 Max. continuous discharge (Continuous)	15A(at 25 °C), 60% at 250 cycle
3.8 Discharge cut-off voltage End of discharge	2.5V
3.9 Cell weight	48.0g max
3.10 Cell dimension	Height : Max 65.0mm Diameter : Max 18.4mm
3.11 Operating temperature (surface temperature)	Charge : 0 to 50 °C (recommended recharge release < 45 °C) Discharge: -20 to 75 °C (recommended re-discharge release < 60 °C)
3.12 Storage temperature (Recovery 90% after storage)	1.5 year -30~25 °C (1*) 3 months -30~45 °C (1*) 1 month -30~60 °C (1*)

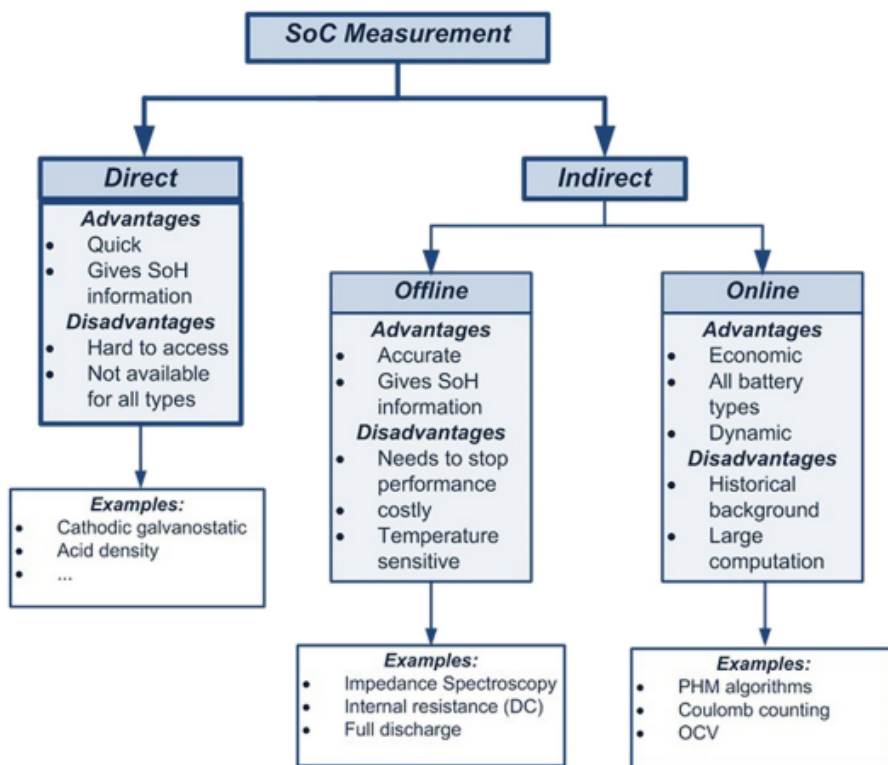
Note (1): If the cell is kept as ex-factory status (40±5% SOC, 25 °C),
the capacity recovery rate is more than 90% of 10A discharge capacity
100% is 2,900mAh at 23 °C with SOC 100% after formation.

Tab. 1.2: Parametry baterie převzato z [5]

Mezi nejvýznamnější parametry patří kapacita baterie, *Úroveň nabití [%]* - *State of charge* (SOC), nabíjecí a vybíjecí proud.

1.2 Metody měření kapacity baterií

Pro měření kapacity baterií můžeme využít mnoho měřicích metod, které lze rozdělit na přímé a nepřímé metody viz obr. 1.2.



Obr. 1.2: Měření úrovně nabití Li-ion článků převzato z [6]

Nepřímé metody

Vyznačují se měřením vybraných elektrických veličin jako je napětí, proud nebo impedance. Další možností měření kapacity je úplné vybití článku².

Přímé metody

Baterie je elektrochemický typ zdroje. Proto pro přímé metody měření kapacity můžeme využít měření přímo parametrů elektrolytu baterie např. jeho hustotu. To se však pro praktické měření Li-ion článků běžně nepoužívá z důvodu náročnosti.

²Na hodnotu udávanou výrobcem článku, podbití pod tuto hodnotu může baterii nenávratně poškodit

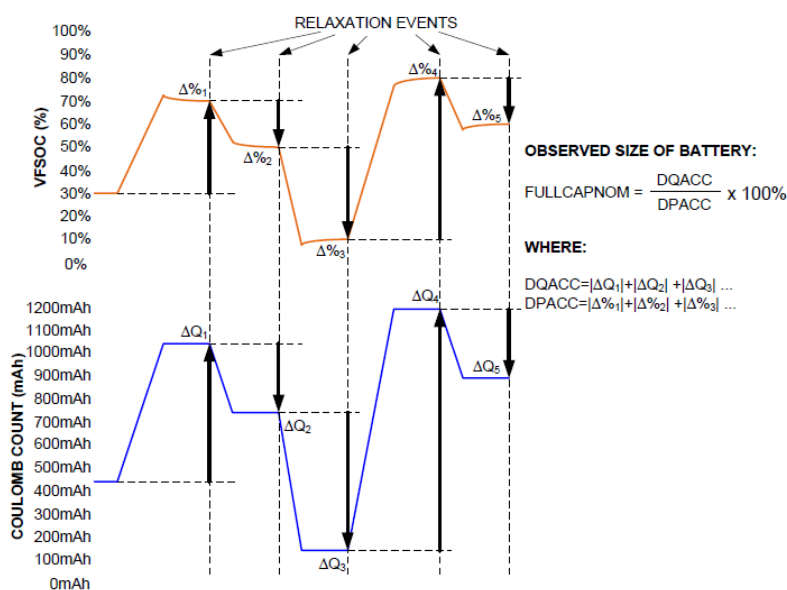
1.2.1 Počítání náboje

Tak by se dala doslovně přeložit nejobvyklejší metoda, kterou implementují prakticky všechny obvody pro správu baterií tzv. Coulomb counting. V principu je tato metoda velmi jednoduchá. Jedná se o integraci proudu, který teče z nebo do měřené baterie. Tato hodnota se pak dále uloží do paměti IO (Integrovaného obvodu) a je možné ji jednoduše dále zpracovat. To popisuje obr. 1.3. Aktuální hodnota získaná z integrace (modrá křivka) se poté převádí na procenta³ a porovnává s hodnotou získanou z napětí naprázdno (oranžová křivka). Je to z důvodu dosažení vyšší přesnosti měření.⁴

Výhody metody jsou:

- Jednoduchost
- Univerzálnost
- Cena
- Určení hodnoty nabití probíhá prakticky okamžitě

Nevýhodou je pak nutnost pravidelně kalibrovat baterii a vysoké nároky na měřící obvody z důvodu offsetu, který se negativně projevuje při integraci a může způsobit značnou odchylku od skutečné hodnoty.



Obr. 1.3: Coulomb counting převzato z [7]

³V závislosti na konkrétní implementaci

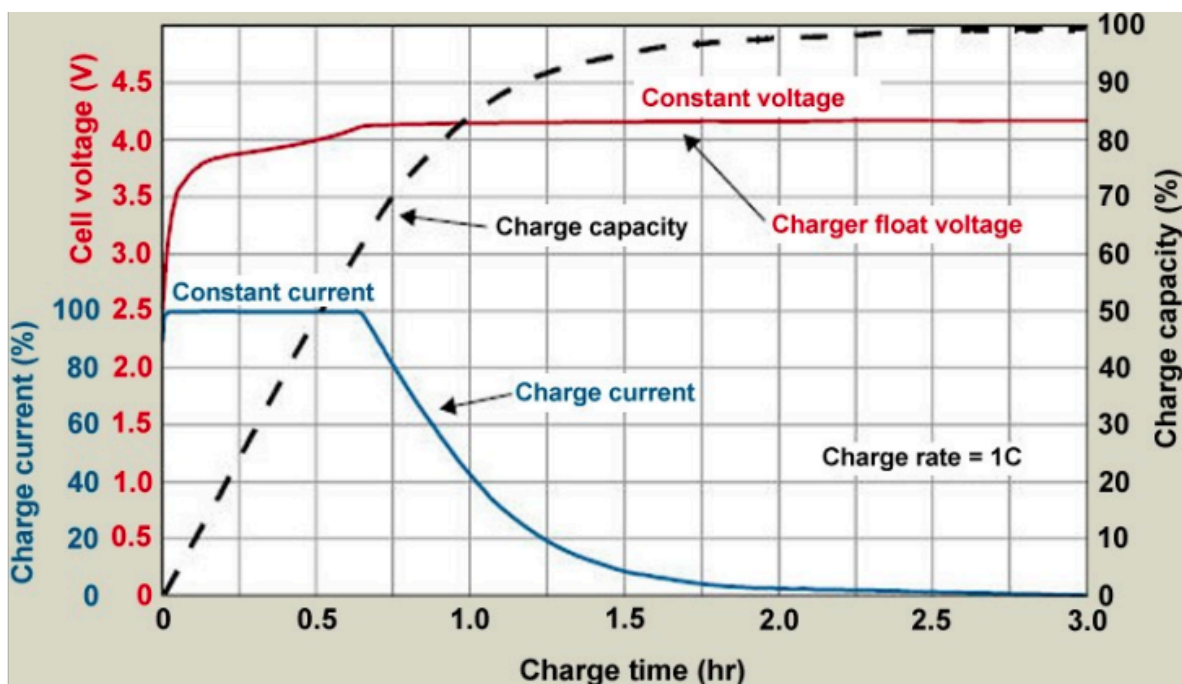
⁴Implementace IO MAX17330

1.3 Rychlost nabíjení a vybíjení baterie

Je označována jako C-rate. Mějme například nabitou baterii s množství uložené energie, které označíme jako 1C. To znamená, že baterie s kapacitou např. 1Ah by měla dokázat dodávat proud o velikosti 1A po dobu jedné hodiny⁵. Stejná baterie pak při hodnotě 2C dokáže teoreticky dodávat proud o velikosti 2A po dobu 30 minut. Obdobný postup platí i pro nabíjení baterie. Tato C hodnota se však liší od C vybíjecí hodnoty. Obě hodnoty jsou také uvedeny v katalogových listech výrobců. [8]

1.4 Nabíjení baterie metodou CC-CV

Standardní metoda pro nabíjení Lithium iontové baterie článků je CC-CV (Constant current - Constant voltage), která je znázorněna na obrázku č. 1.4. Jedná se o dvoufázovou metodu nabíjení⁶.



Obr. 1.4: Typický nabíjecí cyklus, metoda CC-CV převzato z [9]

⁵Omezeno dalšími mezními parametry baterie a ztrátami během vybíjení.

⁶Pokročilé obvody mají tuto metodu doplněnou o část přednabíjení, kdy se využívá konstantního proudu, který je zlomkem proudu v nabíjecí části.

1.4.1 Konstantní proud

V první části nabíjecího cyklu se nabíjí konstantním proudem (modrá křivka) tzn. nezávisle na úrovni nabití článku. To vede k rychlému nabíjení baterie. Tímto způsobem se články nabíjí do určeného prahu napětí. U pokročilých integrovaných obvodů je tato hranice nastavitelná. Nabíjecí obvod udržuje tento režim čtvrtinu až polovinu celkové doby nabíjení.

1.4.2 Konstantní napětí

Aby se zabránilo poškození článku, nabíjecí obvod přechází do druhé části nabíjecího cyklu - do režimu konstantního napětí (červená křivka). Jak vidíme na obrázku č. 1.4 po dosažení prahu, napětí dále nestoupá a drží svou konstantní hodnotu. Proud potom klesá v závislosti na nastavení jednotlivých IO⁷. To vede k pomalému dobití článku na jeho plnou kapacitu. Celková úroveň nabití baterie je zobrazena černou přerušovanou čarou a má charakter setrvačného článku.

⁷Obvykle exponenciálně

2 Obvody pro správu baterií

Cílem práce je srovnání různých obvodů, které současně splňují tyto funkce

- Nabíjení Li-ion baterie
- Měření kapacity baterie
- Ochrana baterie

To splňuje široká skupina IO, které bychom mohli rozdělit na dvě hlavní skupiny

- Obvody realizující základní funkce
- Pokročilé obvody pro správu baterií

Integrované obvody splňující všechny výše uvedené funkce můžeme najít pro jednočlánkové i vícečlánkové baterie. Práce je zaměřena pouze na obvody, které se zaměřují na jednočlánkové baterie.

Významnými filtračními parametry pro rozdělení do dvou výše uvedených skupin byly

- Schopnost komunikovat pomocí sériových sběrnic
- Množství programovatelných funkcí

2.1 Základní obvody pro správu baterií

Jedná se typicky o IO v 8 pinovém pouzdře SOP-8¹. Nabíjení probíhá metodou CC-CV viz 1.4. Regulace konstantního napětí je přednastavena na hodnotu 4,2V. Pokud obvod umožňuje jiné hodnoty výstupního napětí, je to uvedeno v katalogovém listu výrobce. Pro indikaci stavu baterie se nejčastěji využívají externí LED diody.

Nabíjecí proud

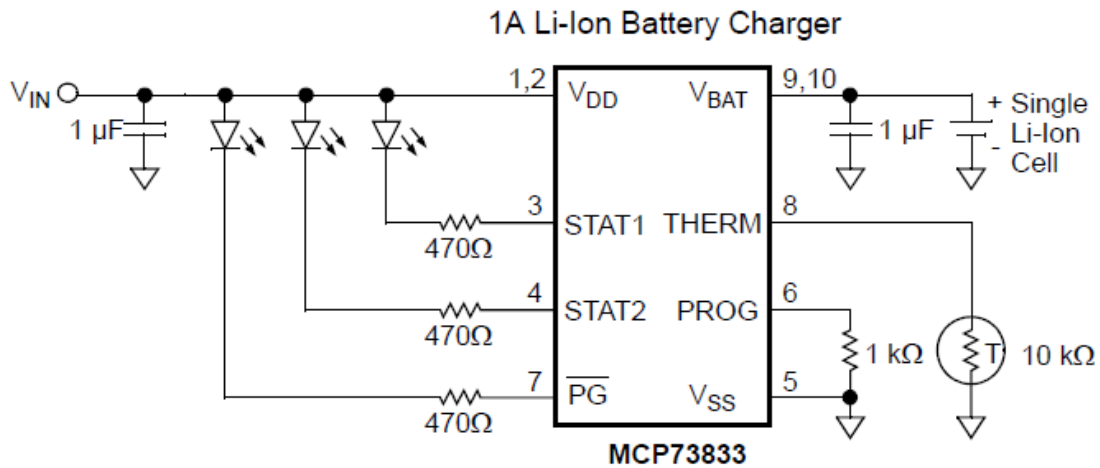
Prakticky všechny tyto obvody umožňují nastavení nabíjecího proudu. Jeho velikost je nastavována vhodnou volbou rezistoru, připojeného mezi určené piny. Vztah pro výpočet hodnoty rezistoru se liší v závislosti na modelu a je vždy uveden v katalogovém listu výrobce.

Např. pro obvod TP4056 navíc kromě vztahu výrobce přímo uvádí tabulku typických hodnot rezistorů a tomu odpovídající hodnoty nabíjecího proudu viz 7.5.

¹Počet pinů a tedy i typ pouzdra závisí na počtu realizovaných funkcí.

Funkce a ochrany

Základní obvody se vyznačují omezeným množstvím programovatelných funkcí². Mezi nejvýznamnější patří funkce automatického dobíjení baterie, ochrana proti podbití článku, tepelná ochrana a detekce obrácení polarity článku.



Obr. 2.1: Typické aplikační schéma základního IO převzato z [10]

²Počet funkcí se může lišit v závislosti na výrobci a daném modelu

2.2 Pokročilé obvody pro správu baterií

Jedná se typicky o IO v maticově uspořádaném pouzdře, s piny umístěnými nejčastěji pod IO³. Regulace konstantního napětí je přednastavena na hodnotu 4,2V a lze ji upravovat nastavením hodnoty v příslušném registru.

Obvody typu PMIC

PMIC (Obvody pro správu napájení - Power management integrated circuit) jsou IO obvody pro zprávu napájení, které realizují některé z těchto funkcí[11]

- DC-DC převod
- Nabíjení baterií
- Výběr zdroje napájení
- Škálování napětí

Porovnání se základními IO

Hlavní výhodou, v porovnání se základními obvody, je vysoká míra přizpůsobení v závislosti na konkrétní aplikaci. Díky celé řadě registrů dokáží IO nastavit pokročilé ochrany, které hlídají parametry baterie a při jejich překročení zastaví nabíjení nebo vybíjení. Dále implementují bezpečnostní funkci watchdog. Během nabíjení umožňují upravovat nabíjecí proud, vypínací napětí nebo omezit teplotu výkonových FET (unipolárních tranzistorů) tranzistorů. Dále pak nabíjejí baterii navíc v módech jako je konstantní výkon⁴, který umožňuje lépe regulovat výkon. Dalšími výhodami jsou vyšší přesnost, obvykle vyšší maximální proudy, průběžný výpočet SOC atd.

Nevýhodami jsou poté vyšší cena a složitost zapojení, které vyžaduje více externích součástek.

³Počet pinů, typicky 9,12 nebo 30 závisí na počtu realizovaných funkcí a implementaci výrobce.

⁴IO MAX17330

3 Kritéria výběru integrovaných obvodů

Jedná se o kritéria výběru pro obvody spravující jednočlánkové Li-ion baterie typu 18650. Pomocí popisu a rozdělení IO v části 2 a vzhledem k vlastnostem baterie uvedené v tabulce 1.2 byly definovány níže uvedená kritéria.

Hlavními kritérii pro výběr IO

Byla schopnost IO udržovat požadovaný nabíjecí proud článku a zajistit konstantní nabíjecí napětí 4,2V

Dalšími kritérii byly

- Vestavěné ochrany
- Programovatelnost nabíjecího proudu baterie
- Dostupnost
- Obtížnost implementace (vývojový kit, pouze samostatný IO)
- Přesnost nastavení a účinnost (ověření měření)
- Způsob programování
- Výrobce
- Pořizovací náklady

Vestavěné ochrany

Základní ochrany, jako je ochrana proti překročení mezních napětí a proti nadproudu, splňují všechny vybrané obvody. Jednotlivé ochrany se liší v závislosti na zvoleném modulu viz tabulka 4.1.

Programovatelnost

U základních IO je programování omezeno na možnost nastavení nabíjecího proudu popř. některých základních funkcí viz 2.1. Pokročilé obvody obsahují navíc registry, kterými je možno nastavovat řadu parametrů viz 2.2

Dostupnost

Výběr IO se zúžil na modely uvedené v tabulce 1.2. Podíváme-li se do zmíněné tabulky můžeme si povšimnout, že některé IO byly při tvorbě této práce vyprodány.

Obtížnost implementace

Při výběru IO jsem preferoval vývojové kity zhotovené výrobcí chipů a to hlavně z důvodu jednoduššího oživení.

Přesnost nastavení a účinnost

Tyto vlastnosti IO budou ověřeny v části měření

Výrobce

Snahou při výběru IO bylo vytvořit průřezové zastoupení trhu v tomto segmentu. Proto jsem při výběru upřednostňoval obvody od více výrobců, před volbou více obvodů od stejného výrobce.

Při tvorbě tabulky 3.1 jsem vycházel z katalogových listů výrobců jednotlivých IO a informací dostupných na webu prodejce Mouser Electronics.

Název	Výrobce	Dostupnost	Maximální výstupní napětí [V]	Nabíjecí proud baterie [A]	Napájecí napětí [V]	Pouzdro	Programování	Provedení
BQ25619RTWR	TI	skladem	4,52	1,5	4 - 13,5	WQFN-24	I2C	IO
STBC02JR	STM	skladem	4,45	0,45	5,4	EV kit	Single wire	Sample
MAX17330	MI	po dohodě dodán	3,6 - 4,8	5,6	5,7	EV kit	I2C	Sample
STC3117	STM	skladem	4,5	--	2,7 - 4,5	9-bump CSP	I2C	IO
TP4056	Toppower	skladem	4,2	1	4,8 - 5,5	ESOP-8	rezistorem	Sample
TP4054	Toppower	skladem	4,2	0,4	4,0 - 8	ESOP-8	rezistorem	IO
BQ24073RGTR	TI	skladem	4,2	1,5	4,3 - 6,4	VQFN-16	rezistorem	IO
MCP73113	Microchip	skladem	4,2	1	6,5	DFN-10	rezistorem	IO
MCP73831-2ACI/MC	Microchip	skladem	4,2	0,015 - 0,5	3,7 - 6	8-VDFN	rezistorem	IO
MCP73833-FCI/UN	Microchip	vyprodaný	4,2	1	6	MSOP	rezistorem	IO
IP5306	INJOINIC	skladem	až 5	2,4	4,5 - 5,5	ESOP-8	neumožňuje	IO

Tab. 3.1: Tabulka vybraných obvodů a jejich parametrů

4 Vybrané integrované obvody pro správu baterií

Tato kapitola popisuje IO, které jsem vybral a shrnul v tabulce 3.1.

4.1 Vybrané základní obvody pro správu baterií

Jak bylo zmíněno v kapitole 2, základní obvody pro správu baterií zajišťují požadované funkce pouze v omezené míře. Pokud se podíváme do tabulky 3.1 obvody se primárně liší velikostí nabíjecího proudu a maximální hodnotou napájecího napětí.

Obvody TP4056 a TP4054

Pokud porovnáme parametry TP4056 s ostatními základními IO vidíme, že je schopný nabíjet baterii výstupním proudem až 1A.

Jeho předností je snadná dostupnost, nízké pořizovací náklady a jednoduchost použití. IO obsahuje ochranu proti přepětí, podpětí i nadproudu. Lze jej zakoupit jako samostatný chip nebo modul. Běžně dostupný a levný modul je vybaven externími součástkami s dvojicí LED diod, které indikují stav nabíjení.

Nevýhodou tohoto IO je pak to, že je primárně určen k nabíjení. Pokud požaduje i řízení vybíjení baterie, musí být doplněn o IO na ochranu baterie (DW01A) a externí modul s tranzistory (FS8205A). K tomu slouží specializovaná verze modulu.

I přes tyto skutečnosti ho považuji za velmi dobrý, o čem svědčí i jeho oblíbenost v nejrůznějších aplikacích. Přesnost dobíjení stanovuje výrobce na 1,5 %. TP4054 je velmi podobný IO TP4056 avšak umožňuje pouze omezený nabíjecí proud 400mA.

Obvod IP5306

Tento IO nesplňuje kritérium programovatelnosti, své parametry má fixně nastaveny přímo od výrobce. Proto je z výběru vyřazen.

MCP73833-FCI/UN

Vybraný IO byl bohužel během tvorby práce vyprodán.

Obvody BQ24073RGTR, MCP73113 a MCP73831-2ACI/MC

Podíváme-li se do tabulky 3.1 vidíme, že jsou si vcelku dost podobné. Vzájemně se liší zejména velikostí nabíjecího proudu baterie. Vzhledem k bodu 2 zadání není možné pro tyto IO napsat obslužný software. Tyto obvody jsou také vhodné pro jednodušší aplikace díky nízké ceně, v porovnání s TP4056 je horší jejich dostupnost.

4.1.1 Výběr ze skupiny základních IO pro správu baterií

Postupoval sekvenčně jednotlivými kritérii až po obtížnost implementace. Po zvážení jeho předností a slabín jsem se rozhodl vybrat IO TP4056 ve verzi modulu. Domnívám se, že dobře reprezentuje celou tuto skupinu a je vhodným zástupcem k porovnání s pokročilými IO. Pro porovnání jsem zakoupil oba typy modulů, tedy jednodušší určený pouze k nabíjení i pokročilejší s obvody pro správu vybíjení.

4.2 Vybrané pokročilé obvody pro správu baterií

Pokročilé obvody pro správu bateriového článku spadají do kategorie PMIC viz 2.2. V průběhu tvorby literární rešerše byly zvoleny čtyři obvody, které jsou uvedeny v tabulce 3.1. Programování probíhá pomocí I2C sběrnice, mimo obvod STBC02, který se programuje pomocí one wire viz 5.2.2. Obvody obsahují registry,- ve kterých úpravou jednotlivých bitů, můžeme snadno nastavovat množství parametrů viz 2.2. Z důvodu narůstající složitosti IO, se zvyšuje množství pinů a výrobci často upřednostňují maticově uspořádání pouzder. Tím vzniká problém při realizaci vlastních testovacích DPS (Deska plošného spoje) zejména při pájení.

Obvod BQ25619RTWR

Tento IO se vyrábí ve variantě samotného chipu i testovací desky. Dále se vyrábí ve variantě BQ25618, která má své piny maticově uspořádány pod IO. Výhodou verze BQ25619 je pouzdro, které má své vývody umístěné na okrajích formou pájecích plošek.

Vlastnosti

Výrobce TI deklaruje u toho IO vysokou účinnost, až 95,5%. Jedná se o komplexní řešení v jenom chipu, které zahrnuje komunikaci, řízení i měření. IO se vyznačuje vysokou přesností napájecího modelu baterie, pinem pro vnější kontrolu při selhání, velkým

vstupním rozsahem napětí a vysokou mírou integrace (snímací rezistor proudu, kompenzační smyčka, výkonové MOSFETy)[12]

Obvod MAX17330

Tento IO mi doporučil produktovým manažerem firmy z důvodu jednoduché aplikace a vlastního algoritmu charakteristiky baterie (ModelGauge m5 EZ).

Vlastnosti

Výrobce udává vysokou přesnost nabíjecího napětí i proudu, řadu programovatelných ochran, SHA šifrování s možností uzamčení citlivých registrů a možnost ukládání dat o využívání baterie. Výkonové MOSFETy jsou umístěny mimo IO. To přináší výhodu v podobě možnosti vyššího proudu. V dostupné konfiguraci s $10m\Omega$ snímacím rezistorem je maximální nabíjecí proud omezen na 2560mA.[7]

Obvod STBC02

Je IO s vysokou mírou integrace s externím pinem pro měření napětí baterie. Programování se v porovnání s předchozími modely provádí prostřednictvím 1-wire sběrnice viz 5.2.2

Vlastnosti

Mezi jeho výhody patří účinný integrovaný LDO (Regulátor s nízkým úbytkem napětí - Low-dropout regulator) a nízký počet externích součástek. Jeho slabinou je omezený proud, který přes obvod může procházet a to pouze 450mA. Proto se hodí do menších zařízení s nižší kapacitou baterie, jako jsou např. zdravotní pomůcky.[13]

Obvod STC3117

Zvolený IO STC3117 splňuje všechny požadavky uvedené v části 3. V procesu dohledávání podrobných informací o IO a po konzultaci s výrobcem bylo zjištěno, že obvod umožňuje nabíjení Lithium iontové baterie článku pouze s přídavným DC-DC měničem. Jako příklad můžeme uvést obvod L7983, který výrobce doporučuje na svých webových stránkách. STC3117 pracuje tak, že pomocí snímacího rezistoru určuje nabíjecí proud baterie a poté pomocí svého výstupu řídí zmíněný měnič. Vzhledem k zadání této práce vybírám IO, které umožňují nabíjení článku 18650 v rámci jednoho chipu, a proto obvod STC3117 vyřazují.

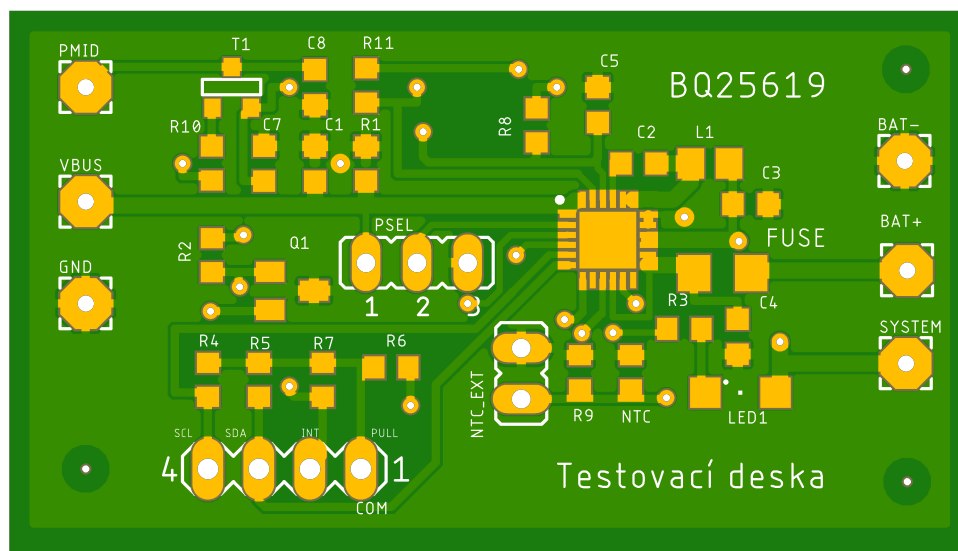
4.3 Shrnutí vybraných IO

V předchozích částech 4.1 a 4.2 jsem vybral čtyři obvody pro správu jednočlánkových Li-ion baterií typu 18650. Vybral jsem je pomocí sérií kritérií a považuji je za nejlepší volbu v době tvorby této práce. Primárním účelem IO TP4056 bude srovnání vlastností a schopností jednoduchého obvodu s pokročilejšími, složitějšími a výrazně dražšími IO. Pokročilé IO jsou vybrány tak, aby reprezentovali, jak IO s nízkými nabíjecími proudy (STBC02), se středními proudy (BQ25619), tak i s vysokými nabíjecími proudy (MAX17330). IO se také liší tím, že vyžadují různé množství externích součástek. Domnívám se, že se jedná o reprezentativní skupinu IO, která dobře reflektuje současné schopnosti, vlastnosti a funkce IO pro správu baterií.

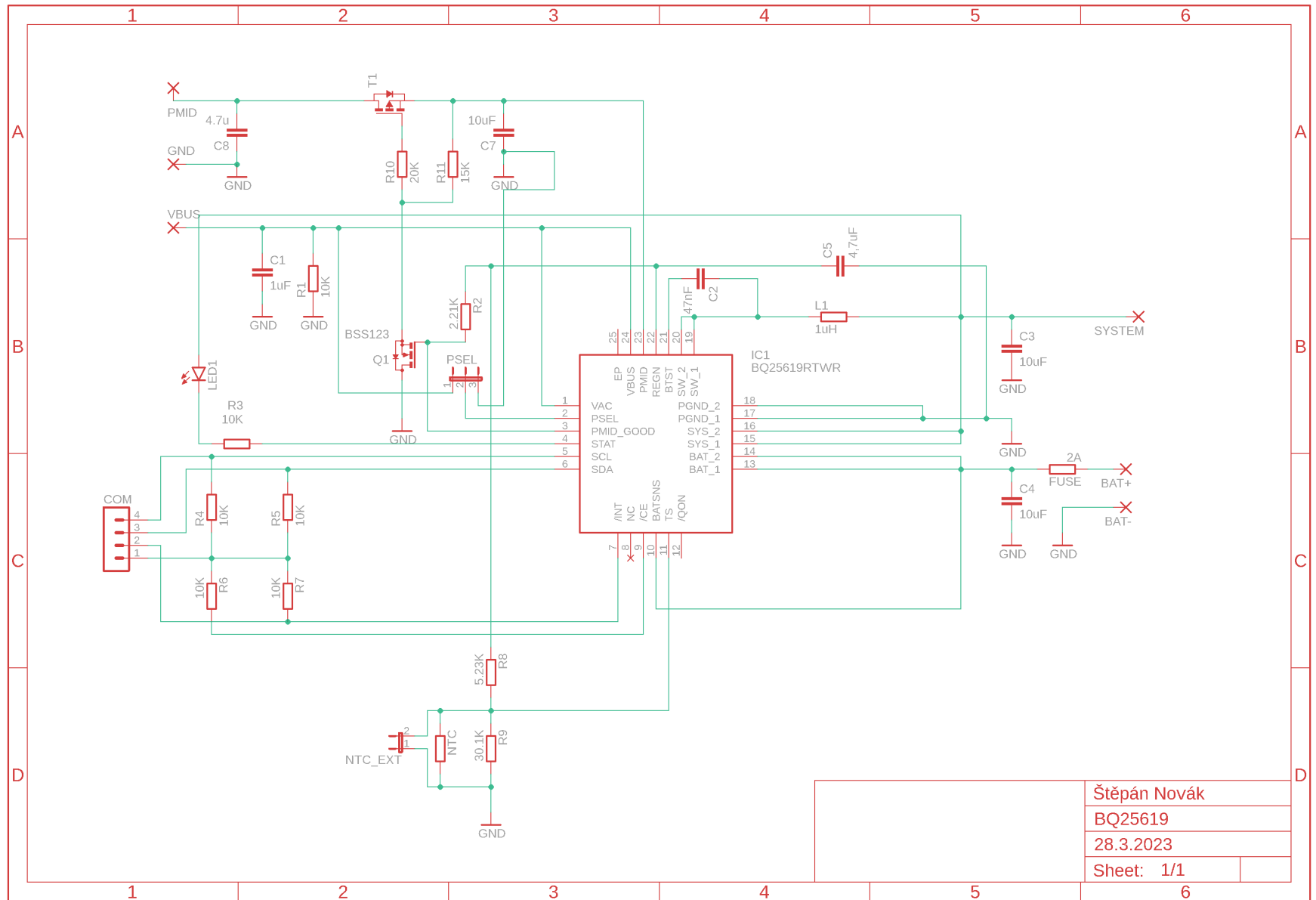
4.3.1 Desky plošných spojů

S využitím přímého kontaktování výrobce jsem zajistil free sample (testovací vzorek zdarma) vývojového kitu MAX17330. IO TP4056 a STBC02 byly zakoupeny ve verzích testovacích desek.

Abychom mohli provést měření IO BQ25619, bylo nutné navrhnout DPS.



Obr. 4.1: Náhled testovací desky BQ25619



Štěpán Novák
 BQ25619
 28.3.2023
 Sheet: 1/1

Obr. 4.2: Schéma testovací desky BQ25619

4.3.2 Integrované ochrany IO

Z informací získaných z katalogových listů výrobců jsem zpracoval přehledovou tabulku ochran jednotlivých IO.

Název IO	NTC	Časovač	Přepětí	Nadproud	Přebití baterie	Nízké napětí	Selhání baterie ¹	Přepolování baterie ¹
BQ25619RTWR	ext	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne
STBC02JR	ext	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
MAX17330	ext + inter	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne
TP4056	ext	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne

[1] Výrobci neuvádí přímo. V případě, že jsem informaci nedohledal předpokládám, že IO není touto ochranou vybaven

Tab. 4.1: Přehled ochranných prvků jednotlivých obvodů

5 Mikroprocesor a sběrnice

Mikroprocesor slouží jako potřebný článek řetězce mezi počítačem a testovaným IO. Hlavním požadavkem byla schopnost umožnit sériovou komunikaci s integrovaným obvodem. Pro tyto účely byla zvolena vývojová deska STM32F303K8T6 Nucleo-32.

5.1 Parametry mikroprocesoru

Mikroprocesor je vybaven 32-bitovým ARM mikroprocesorem, který pracuje na frekvenci až 72 MHz. Jedná o procesor s plovoucí desetinou čárkou. Je vybaven časovači s možností vyvolání přerušení. Mikroprocesor dokáže komunikovat pomocí sběrnic SPI, I2C viz 5.2.1, USART a CAN. Dále pro potřeby debugování můžeme využít sériovou komunikaci pomocí dedikovaných pinů. [14]

Dalšími přednostmi vývojové desky jsou

- Vestavěný debugger
- 12-bit A/D převodník
- Rozteč pinů je kompatibilní s Arduino™ nano.

Pro vytvoření potřebného kódu využijeme vývojové prostředí STM32CubeIDE ve verzi 1.10.1, které vytvořila firma STMicroelectronics.

5.2 Komunikační sběrnice

5.2.1 Sběrnice I2C

I2C (Vnitřní integrovaná sběrnice - Inter-Integrated Circuit) je sériová sběrnice pro připojování periférií. Komunikace probíhá pomocí vodičů SDA a SCL a je založena na schématu Leader-follower. Přenos dat je formou paketů, které se odesílají po vodiči SDA. Vodič SCL slouží k synchronizaci hodinových pulzů. Jedná se o sběrnici s otevřeným kolektorem. Definuji logickou 0 jako signál "L" a logickou 1 jako signál "H"

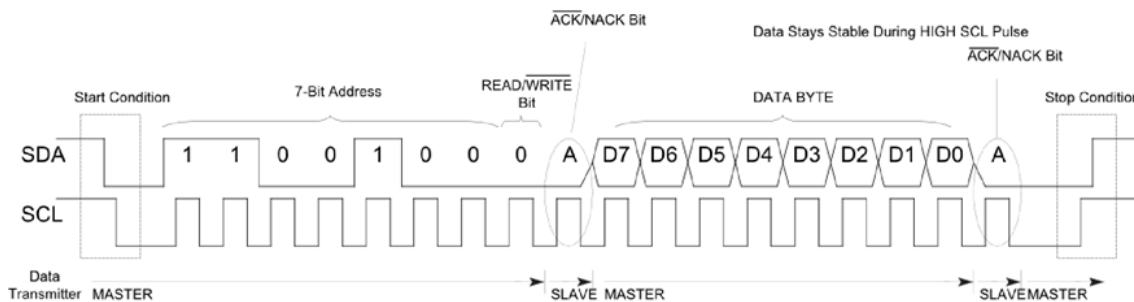
Otevřený kolektor

Výstup je tvořen jedním tranzistorem. Báze tranzistoru je připojena k internímu logickému členu¹, jehož stav určuje logickou úroveň tranzistoru. Ve stavu sepnuto je výstup stažen k potenciálu GND. K otevřenému kolektoru se připojuje pull-up rezistor (řádově 1k až 10k podle typu logiky), který zajišťuje logickou úroveň "H" ve stavu rozepnuto.[15]

Průběh komunikace

Jedná se o multi-leader sběrnici. To umožňuje její jednoduché rozšiřování, IO jsou vybírány adresami. Neaktivní účastníci sběrnice zůstávají ve stavu vysoké impedance.

Na obrázku č.5.1 vidíme průběh komunikace. Jako první se po start podmínce přenáší 7 nebo 10 bitová adresa přijímače. Poté následuje bit, který určuje zda se jedná o čtení nebo zápis a potvrzovací bit. Dále se odešle 8 datových bitů, potvrzovací bit a v případě ukončení komunikace stop podmínka.



Obr. 5.1: Průběh komunikace na sběrnici I2C převzato z[16]

Detekce kolizí

Kterýkoliv z účastníků může zahájit vysílání, pokud je předtím sběrnice v klidovém stavu ("H"). Během vysílání porovnává vysílané bity se skutečným stavem SDA. Je-li zjištěn rozdíl mezi očekávaným a skutečným stavem linky, došlo ke kolizi mezi účastníky. Obvod, který na lince zjistí např. úroveň "L" zatímco sám vysílá "H" musí vysílání ukončit. Potvrzení přijetí signálu se provádí acknowledge bitem.

¹Zapojení umožňuje vyšší proudový odběr než kdybychom zapojily výstup přímo na logický člen.

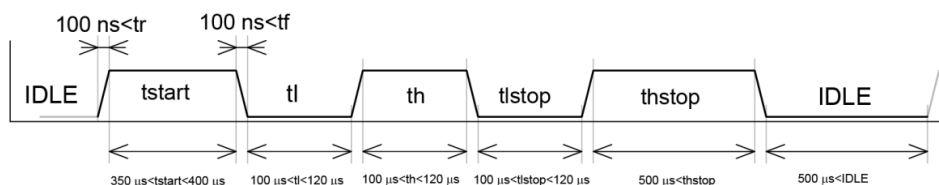
5.2.2 Jednovodičová komunikace 1-Wire

Jedná se o jednoduchý a nízkonákladový způsob přenosu dat mezi zařízeními pomocí jediného vodiče. Je to podobný koncept jako je I2C s vyšším dosahem, avšak horší propustností. Z tohoto důvodu se využívá pro komunikaci např. se senzory teploty. Využívá se metody otevřeného kolektoru viz 5.2.1.

Průběh komunikace

Na sběrnici je pouze jeden Leader, který iniciuje činnost a ovládá celý proces komunikace. Komunikace probíhá tak, že Leader komunikuje s jedním nebo více followery pomocí sériového přenosu dat. Follower zařízení odpovídají na příkazy a přenášejí data zpět. V případě kolize Leader opakuje vysílání.

Doba potřebná ke změně jednoho bitu se označuje jako časový slot².



Obr. 5.2: Průběh komunikace One wire převzato z[13]

Výrobce IO STBC02 doporučuje tyto velikosti programovacích pulzů [13]

- Start bit 350 μs až 400 μs
- Programovací pulz 100 μs až 120 μs
- Stop bit \geq 500 μs

Obecně je rozlišován dlouhý a krátký impuls. Pokud chceme naprogramovat IO STBC02 stačí nám pouze bitstream (sekvence bitů) o požadovaném počtu bitů, při zachování velikostí pulzů uvedených výše.[13] Ukázka bitstreamu pěti bitů je zobrazen v příloze A.1. Programové řešení je součástí elektronických příloh.

²Uveden v katalogovém listu výrobce

6 Oživení obvodů

Ožívání obvodů je proces, při kterém využijeme informace získané z katalogových listů výrobců ke správnému zapojení, naprogramování a otestování výše popsaných IO. Dále budu pracovat se třemi testovacími deskami navrženými výrobcem a jednou podle vlastního návrhu.

6.1 Software MAX17330 EV Kit Software

Jedná se o software určený k testování IO MAX17330, který vyvíjí firma Analog devices a je volně přístupný ke stažení na webových stránkách výrobce. V době tvorby této práce využívám verzi 1.0.3. Práce s tímto softwarem je jednoduchá a značně usnadňuje testování IO. Mezi nejvýznamnější funkce patří:

- Automatické navázání komunikace
- Úprava modelu baterie
- Vizualizace aktuálních dat, aktivních ochran, záznam do grafů
- Snadné nastavování registrů
- Možnost šifrování IO
- Exportování naměřených dat

Voltages	Addr	Hex	Value
VCell	6C:1A	0xA4A6	3.293V
AvgVCell	6C:19	0xC178	3.869V
ChargingVoltage	6C:2A	0xD200	4.200V
Batt	6C:D7	0x2A3C	3.379V
PCKP	6C:DB	0x3D5C	4.909V
VFOCV	6C:FB	0xD0E2	4.178V
VRipple	6C:B2	0x0D6C	0.034V

Obr. 6.1: Ukázka registrů z programu MAX17330

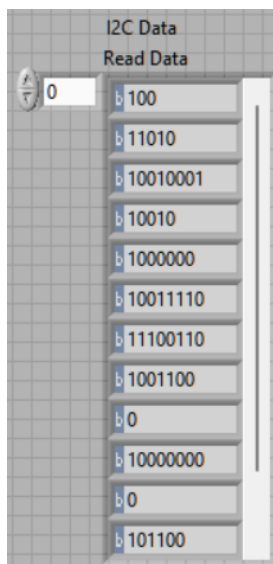
Nejprve je nutné připojit baterii a zdroj (popř. zátěž) a program zajistí automatické připojení. Tento software využívám k nastavení modelu baterie a vyresetování ochran. Samotné čtení dat z registrů zajišťuje vlastní program v Labview.

6.2 STM32 Nucleo

Pro naprogramování funkcí IO STBC02 využijí doporučený mikroprocesor STM32 Nucleo viz kapitola 5. Jedná se zejména o zapisování dat do registrů, které využívají sběrnici 1-wire 5.2.2. STM32 Nucleo bohužel není vybaveno touto komunikací, a proto je nezbytné vytvořit vlastní program. Ten, pomocí digitálního pinu a přerušení, umožňuje vyslání požadovaného počtu bitů při zachování požadovaných šířek pulzů.

6.3 BQ25169

Oživení tohoto IO se mi podařilo pouze částečně. Po zapájení dle návrhu 4.3.1 byl obvod schopen řídit vybíjení baterie, ale nezačal baterii nabíjet. První verze testovací desky nechtěla komunikovat po I2C¹. Proto byla osazena druhá testovací deska, která komunikovala správně.



Obr. 6.2: Načtené registry BQ25619

Obvod indikuje, že není připojeno vstupní napětí. Provedl jsem měření obvodových součástek a přepájení pinů IO, ale bezvýsledně. Bohužel jsem neměl k dispozici více IO pro výměnu, a proto byla změřena pouze vybíjecí charakteristika viz 9.8.

¹Pravděpodobně byl chip při pájení mírně posunutý vůči ploškám na DPS

7 Měření

V této kapitole budu popisovat postup měření, programová řešení a použité měřicí přístroje. Cílem měření je proměřit přesnost parametrů uváděných výrobcí a otestovat vybrané ochrany.

7.1 Tolerance IO

IO	Chyba nabíjecího napětí [%]		Chyba nabíjecího proudu [%]	
	min	max	min	max
TP4056	± 1,5		---	
BQ25619 ^[1]	-0,4	0,03	-1	9
MAX17330 ^[2]	± 0,179		-1	1,4
STBC02 [3]	± 0,5		---	

[1] Chyba proudu je odečtena z grafu a závisí na velikosti proudu

[2] Chyba A/D převodníku ± 1% proud ± 7,5mV napětí

[3] ± 0,3V na měřeném pinu BATMS

Tab. 7.1: Přehled tolerancí pro nabíjení udávaný výrobcí

Hodnoty v tabulce 7.1 jsou přepočteny na procenta. Některé hodnoty se mi bohužel nepodařilo dohledat nebo je výrobce ve svém katalogovém listu neuvádí.

7.2 Vybraná měření

Měření ověřují základní schopnosti IO správně nabíjet a vybíjet jednočlánkové Li-ion baterie a zajistit ochranu proti překročení mezních parametrů. Cílem je také ověřit přesnosti hodnot, které měří IO a poté je porovnat se stolními multimetry.

Název měření	BQ25619RTWR	STBC02	MAX17330	TP4056
Přesnost napětí (4,2V)	Ano	Ano	Ano	Ano
Nabíjecí charakteristika	Ano	Ano	Ano	Ano
Vybíjecí charakteristika	Ano	Ano	Ano	Ano
Ochrana baterie	Ano	Ano	Ano	Ano
Účinnost	Ano	Ano	Ano	Ano
Přesnost stanovení kapacity	Ano	Ano	Ano	Ano

Tab. 7.2: Tabulka měření

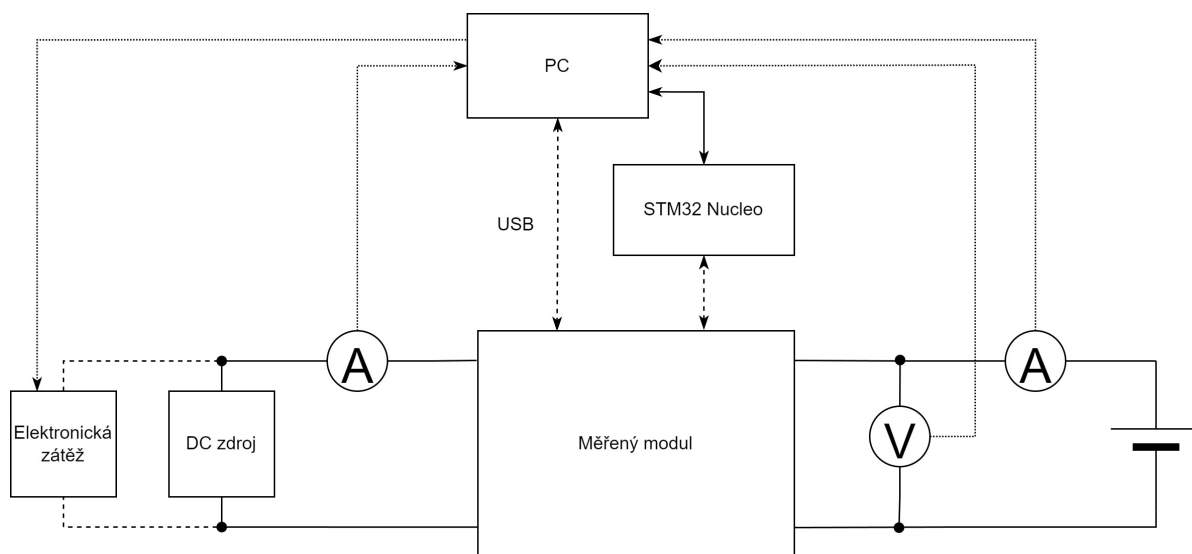
Z tabulky 7.2 vyplývá, že budeme potřebovat několik stolních multimetrů, nastavitelný DC zdroj a elektronickou zátěž. Vzhledem k velkému množství dat bude taky potřeba software pro automatické měření.

Nejprve proměřím celou charakteristiku nabíjení a vybíjení typickým proudem pro každý IO, při určené vzorkovací periodě viz 7.5. Poté proměřím zajímavá místa charakteristiky pro různé hodnoty proudů. Nejvíce mě budou zajímat oblasti, ve kterých zareagují ochrany proti podbití baterie a oblasti, ve kterých dojde k úplnému nabití baterie.

7.2.1 Zapojení

Blokové schéma měření je zobrazeno na obr. 7.1. Vstupní napětí je nastaveno na 5V. Protože se nejedná o zásadní parametr, neověřuji nastavenou hodnotu stabilizovaného zdroje multimetrem. Na výstupu z měřeného modulu měřím napětí, které je prakticky totožné s hodnotou, kterou měří i IO. Rozdílné jsou však přesnosti měření. Výstupní proud je důležitým parametrem, díky kterému je možné změřit nabíjecí charakteristiku a určit přepínání mezi režimy. Pokud je zanedbán velmi malý proud procházející voltmetrem platí, že měřený proud odpovídá proudu, který nabíjí/vybíjí baterií. Pro určení účinnosti IO využiji vstupní ampérmetr.

Multimetry a USB převodník jsou řízeny pomocí vlastního programu v Labview.



Obr. 7.1: Blokové schéma zapojení

7.2.2 Postup měření

Nejprve pro minimalizaci vlivu přechodových odporů využiji desku viz 7.2.4 a kabely napájím na příslušné plošky testovaného modulu. Poté zapojím měřicí přístroje a baterii na příslušné svorky. Dále připojím vodiče pro komunikaci po I2C¹ a podle typu měření vyberu DC zdroj nebo zátěž. Pro nabíjení volím proudové omezení 3A. Důvodem je vyloučení stavu, kdy IO přejde do režimu, který omezuje nabíjení. V případě vybíjení volím zátěž konstantním proudem viz tab. 7.4.

V dalším kroku nastavím rozhraní v měřicím programu², odpojím USB kabel, zapnu zdroj/zátěž a spustím měření dat pomocí Labview.

Po proměření žádané charakteristiky měření vypnu tlačítkem stop a rozpojím měřicí obvod. Pro měření vstupního proudu a výstupního napětí použiji multimetry Keysight 34450A. Pro měření výstupního proudu použiji přesnější multimetr Agilent 34410A viz 7.3.

7.2.3 Proudová omezení

Každý IO je omezen maximální hodnotou proudu, který může skrze něj procházet. Tyto údaje shrnuje následující tabulka.

IO	I _{MAX} [A]	
	Vybíjecí	Nabíjecí
TP4056	3	1,05
MAX17330 ¹	3	2,56
STBC02	0,5	0,45
BQ25619	3	1,5

[1] Omezeno sense rezistorem

Tab. 7.3: Proudová omezení

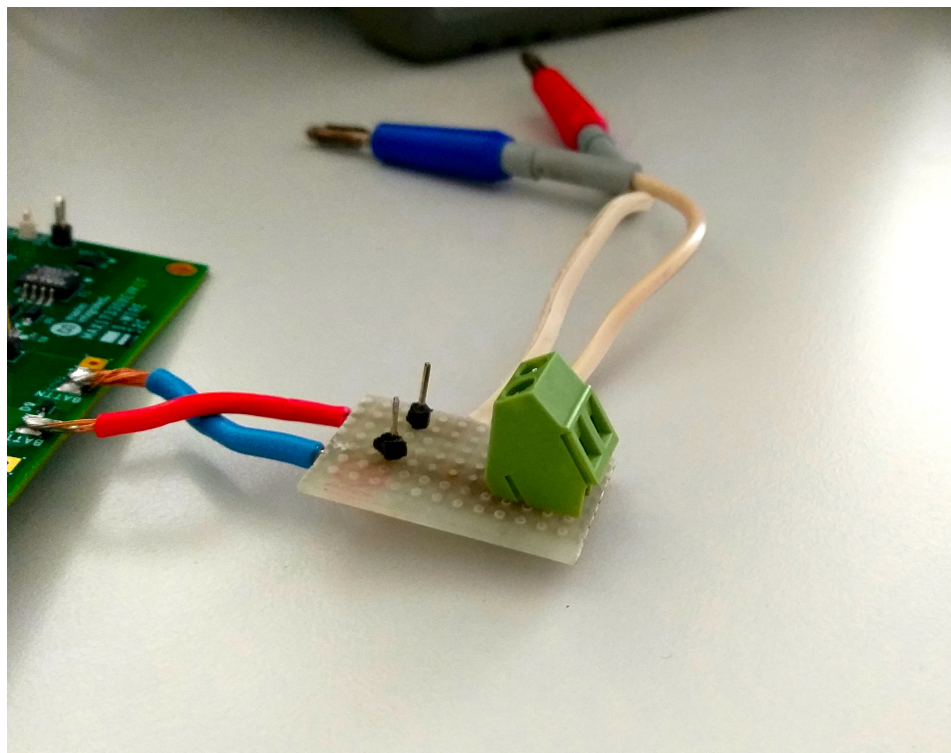
Dalším omezením je maximální proud, který může procházet skrze výstupní ampérmetr Agilent 34410A. Ten je omezen na hodnotu 3A. Vstupní proud je omezen ampérmetrem Keysight 34450A na 10A.

¹Pokud to IO umožňuje

²V případě obvodu MAX17330 ještě před zapnutím programu v Labview provedu nastavení pomocí softwaru MAX 17330 EV Kit 6.1

7.2.4 Minimalizace přechodových odporů

Při testování prvního obvodu jsem narazil na negativní vliv přechodových odporů a odporu vodičů. To mělo za následek zkreslení naměřených dat, zejména pro vyšší proudy. Např. při procházejícím proudu 1A docházelo k úbytku 100mV na vodičích viz část 9. Proto jsem se rozhodl vytvořit spojovací DPS na univerzální desce, která spolu s krátkými vodiči o velkém průřezu zajistila značné zpřesnění měření.



Obr. 7.2: DPS k minimalizaci parazitních odporů

Provedl jsem čtyřvodičové měření odporu vytvořené DPS a pomocí statistické funkce multimetru jsem určil průměrnou hodnotu³ 56 $m\Omega$.

³Z 50 naměřených vzorků

7.3 Použité přístroje

GPD-3303S

Jedná se o nastavitelný stabilizovaný DC zdroj se dvěma výstupy 0-30V s možností nastavení proudového omezení až 3,2A.[17] S.N. (Sériové číslo - Serial number) přístroje GES836981

Agilent 6063B

Je 250W elektronická zátěž, kterou využívám primárně k simulování skutečných spotřebičů, které by baterie prostřednictvím IO napájela. S.N. MY4100146

Agilent 34410A

Je $6\frac{1}{2}$ digitový multimetr. K dispozici je 1ks. Porovnáme-li tento multimetr s Keysight 34450A zjistíme, že jeho přesnost je vyšší pro měření DC napětí i proudu [18]. Připojení je zajištěno pomocí USB výstupu a ovladače do LabView. S.N. MY47001058

Keysight 34450A

Je $5\frac{1}{2}$ digitový multimetr. K dispozici jsou 3 ks. Vzhledem k jeho nižší přesnosti, v porovnání s multimetrem Agilent 34410A, budu tyto multimetry používat pro méně náročná měření. Připojení je zajištěno pomocí USB výstupu a ovladače do LabView. S.N. MY58160080, MY58160037, MY5810040

NI USB-8451

Je komunikační karta vyvinutá firmou National Instruments jako převodník mezi USB a I2C komunikací. Pomocí této karty jsou získávány data z měřeného obvodu pro další zpracování pomocí Labview. Mezi její výhody patří snadná instalace ovladačů a připravené příklady použití v Labview. S.N. 15603C6

7.4 LabView

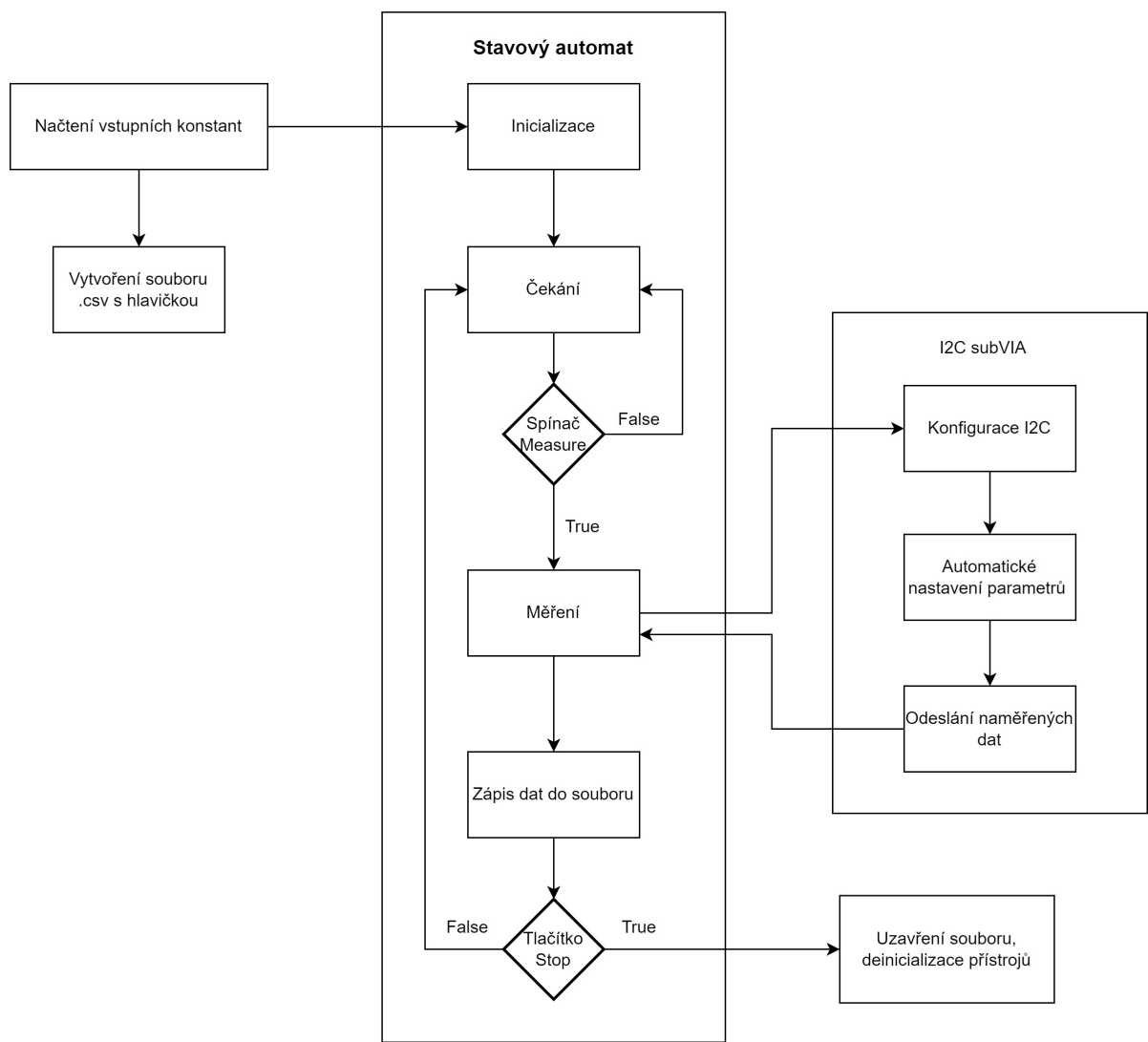
Software LabView, vyvíjený společností NI (National Instruments), nám umožňuje automatizovat celé měření a tím výrazně snížit celkovou časovou náročnost. Svou schopností měřit pomocí více připojených přístrojů, zajišťuje Labview paralelní odečet dat. Ty je možné poté jednoduše uložit do csv souboru. Pomocí vestavěného nástroje jsem jednoduše získal ovladače pro všechny přístroje. Následné zpracování dat je provedeno pomocí

softwaru Matlab.

Používanou verzí je NI LabVIEW 2020 (64-bit).

Programování v LabView

Programování probíhá pomocí umísťování bloků a jejich propojování. Základ programu tvoří super smyčka while, ve které je vložen case stavový automat. V části měření se volá subVI pro komunikaci pomocí I2C.



Obr. 7.3: Blokové schéma stavového diagramu

Inicializace

V první části dojde k vytvoření nového souboru s hlavičkou a načtou se vstupní konstanty např. adresa měřicího přístroje nebo typ měření. Poté se provede inicializace přístrojů a stavový automat přejde do stavu wait.

Stav Wait

Ve stavu wait program čeká na přepnutí přepínače měření. Ve stavu wait je také implementováno časování k dosažení konstantní periody vzorkování, kterou lze v průběhu běhu programu měnit. Poté dojde k přepnutí do bloku měření.

Měření

V této části multimetry získají požadovaná data, které se uloží do pole. Získávanými daty jsou hodnoty napětí a proudů. V závislosti na konkrétním měření volím množství multimetrů. Zároveň dochází k postupnému nastavování parametrů pro subVI a vyčítání hodnot, které se ukládají do shift registru. Načtená data z měřeného obvodu se spolu s daty z multimetrů uloží do pole a převedou na datový typ string. K datům se přidá informace o času měření a stavový automat přejde do stavu write, který je určen pro zápis dat.

Zápis dat

Po získání naměřených dat dojde k zápisu do připraveného csv souboru. Formát csv volím z důvodu snadného zpracování. V případě neaktivního tlačítka stop dojde k přechodu do stavu wait a opakování cyklu.

Konec programu

Při stisknutí tlačítka stop dojde k resetování přístrojů, uzavření souboru a k ukončení programu.

7.5 Perioda měření

Periodu měření volíme s ohledem na charakter měřené veličiny. Pokud měřím vysoké proudy předpokládám rychlou změnu parametrů, a proto volím nízkou periodu vzorkování, abych zachytil co nejvíce důležitých dat. V případě nízkých proudů by nízká perioda vzorkování vedla pouze k neúměrnému nárůstu dat s minimálním přínosem pro výsledek měření.

Měření		Hodnota proudu [A]	Počet měření				Periody měření [s]	Odhadovaný čas měření [min] ¹
			TP4056	MAX17330	BQ25619 ^[2]	STBC02		
Nabíjení	celá charakteristika	1,2	0	1	0	1 ^[3]	15	130
		1	1	0	0	0	15	165
		0,5	0	1	0	0	15	300
		0,4	1	0	0	1 ^[4]	15	330
	část charakteristiky	0,1	1	1	0	1	30	150
Vybíjení	celá charakteristika	3	0	1	0	0	1	30
		2,5	1	0	0	0	1	45
		1	1	1	1	0	15	165
		0,5	0	1	0	0	15	300
		0,4	0	0	0	1	15	330
	část charakteristiky	0,1	1	0	0	0	30	150

[1] Pro jedno měření

[2] IO se nepodařilo plně oživit viz kap. 6

[3] Měření nebylo plánováno, vzniklo jako reakce na neočekávaný stav IO viz kap. 9

[4] Z technických důvodů nedoměřeno viz kap. 9

Tab. 7.4: Tabulka period měření pro různé proudy

Tabulka 7.4 dále uvádí počet měření jednotlivými obvody a odhadovaný čas měření. Skutečná perioda se od uvedené mírně liší. Je to způsobeno zdržením v průběhu vykonávání programu⁴ a je to zohledněno při zpracovávání dat.

Jako základní jsem zvolil periodu 15s, která dle mého názor nejlépe vystihuje poměr mezi množstvím vzorků a snahou zachytit i drobné odchylky. Cílem bylo nepřesáhnout více jak 1500 vzorků na jedno měření. Další dílčí periody jsou dány jako poměry k této základní periodě.

⁴2 sekundy

7.6 Specifika měření vybraných IO

TP4056

IO TP4056 není vybaven registry. Jeho nabíjecí proud je pevně stanoven rezistorem. Výchozí hodnota modulu je 1,2K což odpovídá maximální hodnotě 1A.

Rprog Current Setting

R _{PROG} (k)	I _{BAT} (mA)
10	130
5	250
4	300
3	400
2	580
1.66	690
1.5	780
1.33	900
1.2	1000

Tab. 7.5: Tabulka nabíjecího proudu pro různé hodnoty rezistoru převzato z [19]

Abych dokázal proměřit charakteristiky pro různé proudy, rezistor vyměním a provedu měření.

MAX17330

Jako referenční volím výrobcem přednastavený model baterie⁵. Nabíjecí proud se mění v závislosti na fázi nabíjení. Maximální možný proud je omezen kombinací snímacího rezistoru a ochrany proti podbití článku, která odpojí výstup v případě, kdy napětí na baterii klesne pod stanovenou hodnotu⁶.

STBC02

IO STBC02 je vybaven registry, které slouží pouze k nastavování funkcí. Obvod navíc disponuje vývody k přímému měření napětí baterie. Se stejnou hodnou poté pracuje i chip při regulaci. K měření využiji multimetr Keysight 34410A. V případě embedded (vestavěné) aplikace je možné tyto data číst pomocí A/D převodníku⁷.

⁵ModelGauge m5 EZ Algorithm

⁶Výchozí hodnota je 2,6V

⁷Nezbytná 5V logika

V dostupném aplikačním návodu je popsána procedura testování. Po zapojení měřících přístrojů a napájení je nezbytné přidat $33\ \Omega$ mezi piny LDO a GND. Dále využijí toho, že se jedná o testovací desku. Pro měření malých proudů (100mA) připojím sériově k rezistoru, který řídí velikost nabíjecího proudu, trimr a nastavím přesnou hodnotu proudu.

BQ25619

Jak bylo zmíněno v části 6.3 testovaný modul je schopen pouze vybíjet. Proto proměřím pouze jednu celou vybíjecí charakteristiku viz 9.

8 Zpracování naměřených dat

Zpracování dat je důležitou částí této bakalářské práce. Tato kapitola se zaměřuje na převod hodnot a určení nejistot.

8.1 Řešení pomocí programu Matlab

Pro zpracování naměřených dat jsem zvolil software MATLAB ve verzi R2022b. Výhodou tohoto softwaru je jednoduchá práce s velkým množstvím dat a funkce jako např. `errorbar`, který umožňuje vykreslení grafu i s odchylkami. Protože se u každého IO vyčítá jiné množství dat, volím pro každý IO vlastní script.

8.2 Převod hodnot

Tento IO vyžaduje bitový posun adresy čipu i vyčítaného registru o jeden bit doprava. Abychom mohli naměřená data zpracovat, je nutné některé veličiny převést. Jedná se zejména o data získaná z registrů, které se vynásobí převodní konstantou udávanou výrobcem.

MAX17330

Přepočty provedu pomocí tabulky 8.1 uváděné v katalogovém listu výrobce [7].

REGISTER TYPE	LSB SIZE	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE	NOTES
Capacity	5.0 μ Vh/ R _{SENSE}	0 μ Vh	327.675mVh/ R _{SENSE}	Equivalent to 0.5mAh with a 10m Ω sense resistor.
Percentage	1/256%	0%	255.9961%	1% LSB when reading only the upper byte.
Voltage	78.125 μ V	0V	5.11992V	
Current	1.5625 μ V/ R _{SENSE}	-51.2mV/ R _{SENSE}	51.1984mV/ R _{SENSE}	Signed 2's complement format. Equivalent to 156.25 μ A with a 10m Ω sense resistor.
Temperature	1/256 $^{\circ}$ C	-128 $^{\circ}$ C	127.996 $^{\circ}$ C	Signed 2's complement format. 1 $^{\circ}$ C LSB when reading only the upper byte.
Resistance	1/4096 Ω	0 Ω	15.99976 Ω	
Time	5.625s	0s	102.3984hr	
Special				Format details are included with the register description.

Tab. 8.1: Tabulka přepočtu hodnot získaných z registrů převzato z [7]

$$U_M = LSB \cdot U_R \quad (8.1)$$

kde

U_M je přepočtená hodnota

U_R je hodnota získaná z registru.

Výpočet probíhá automaticky v subVI, které zajišťuje I2C komunikaci a převedená data se přímo ukládají do příslušného sloupce v csv souboru.

Obvody TP4046, STBC02, BQ25619

Tyto IO nevyžadují převod dat. Hodnoty IO STBC02 jsou měřeny externím multimetrem a jsou rovněž ukládány do csv souboru.

8.3 Nejistoty

Nejistoty měření jsou nedílnou součástí každého měření a vyjadřují míru nejistoty, kterou máme vůči výsledku měření.

Zdroje nejistot

Jako hlavní zdroj nejistot bych identifikoval přesnost měřicích přístrojů, která je udávána v katalogových listech výrobců. Dále také závisí na měřicím rozsahu, na kterém multimetr měří.

Příklad výpočtu

Níže uvádím příklad výpočtu nejistoty multimetru Keysight 34450A s využitím katalogového listu výrobce[20]. Předpokládám dobu od kalibrace delší než 1 rok. Měření probíhalo na napěťovém rozsahu 10V, výpočet provádím pro hodnotu $U = 4,20V$

Výrobce udává DC accuracy \pm (% of reading + % of range)

$$0.0020 + 0.0008$$

$$\Delta_{MAX} = \frac{\delta_U U + \delta_R U_R}{100}$$

$$\Delta_{MAX} = \frac{0,002 \cdot 4,20 + 0,0008 \cdot 10}{100} = 0,16 \text{ mV}$$

Nejistota typu A

Nejistota A je v případě měření řádově menší než nejistoty dalších veličin. Proto můžou být tyto veličiny zanedbány bez praktického vlivu.

$$u_A = 0$$

Nejistota typu B

Volím normální rozložení $\lambda = \sqrt{3}$ a koeficient rozšíření $k_u = 3$

$$u_B = \frac{\Delta_{MAX}}{\lambda}$$

$$u_B = \frac{0,16 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 94,69 \mu V$$

Kombinovaná nejistota

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$u_C = 94,69 \mu V$$

Celková nejistota

$$U(U) = k_u \cdot u_C$$

$$U(U) = 3 \cdot 94,69 \cdot 10^{-3} = 0,28 \text{ mV}$$

$$U = U \pm U(U)$$

$$U = (4200,00 \pm 0,28) \text{ mV}$$

Pomocí programu Matlab viz 8.1 provádím automatický výpočet pro všechny naměřené hodnoty a poté je využívám při vykreslování grafů.

8.4 Účinnost IO

Účinnost nabíjecí obvodu je dána vztahem

$$\eta = \frac{U_M \cdot I_{výst}}{U_Z \cdot I_{vst}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8.2)$$

kde

U_M je výstupní napětí modulu

$I_{výst}$ je výstupní proud modulu

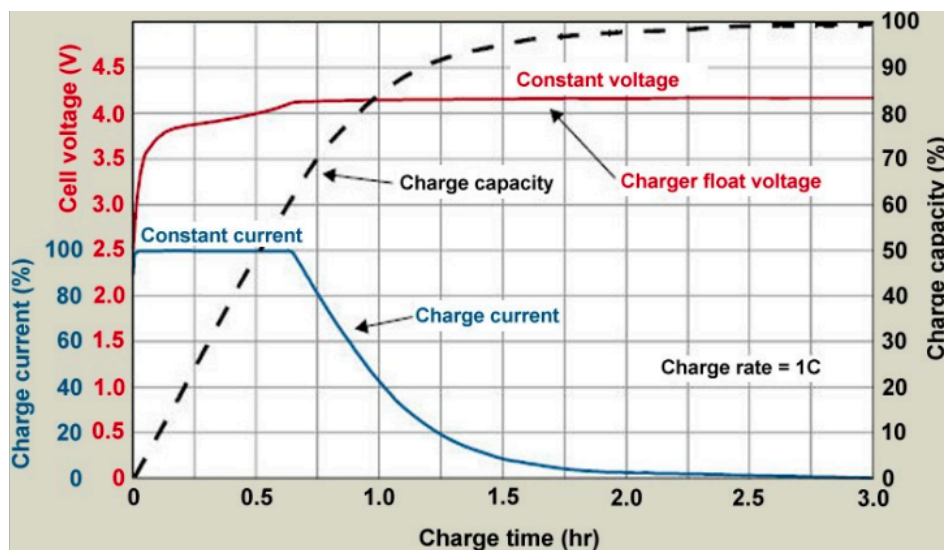
U_Z je napětí napájecího zdroje

I_{vst} je vstupní proud modulu

Výpočet účinností probíhá automaticky v Matlab scriptu a jsou vykreslovány v části 9 a jsou pomocí ní porovnávány IO v části 10.

9 Výsledky měření

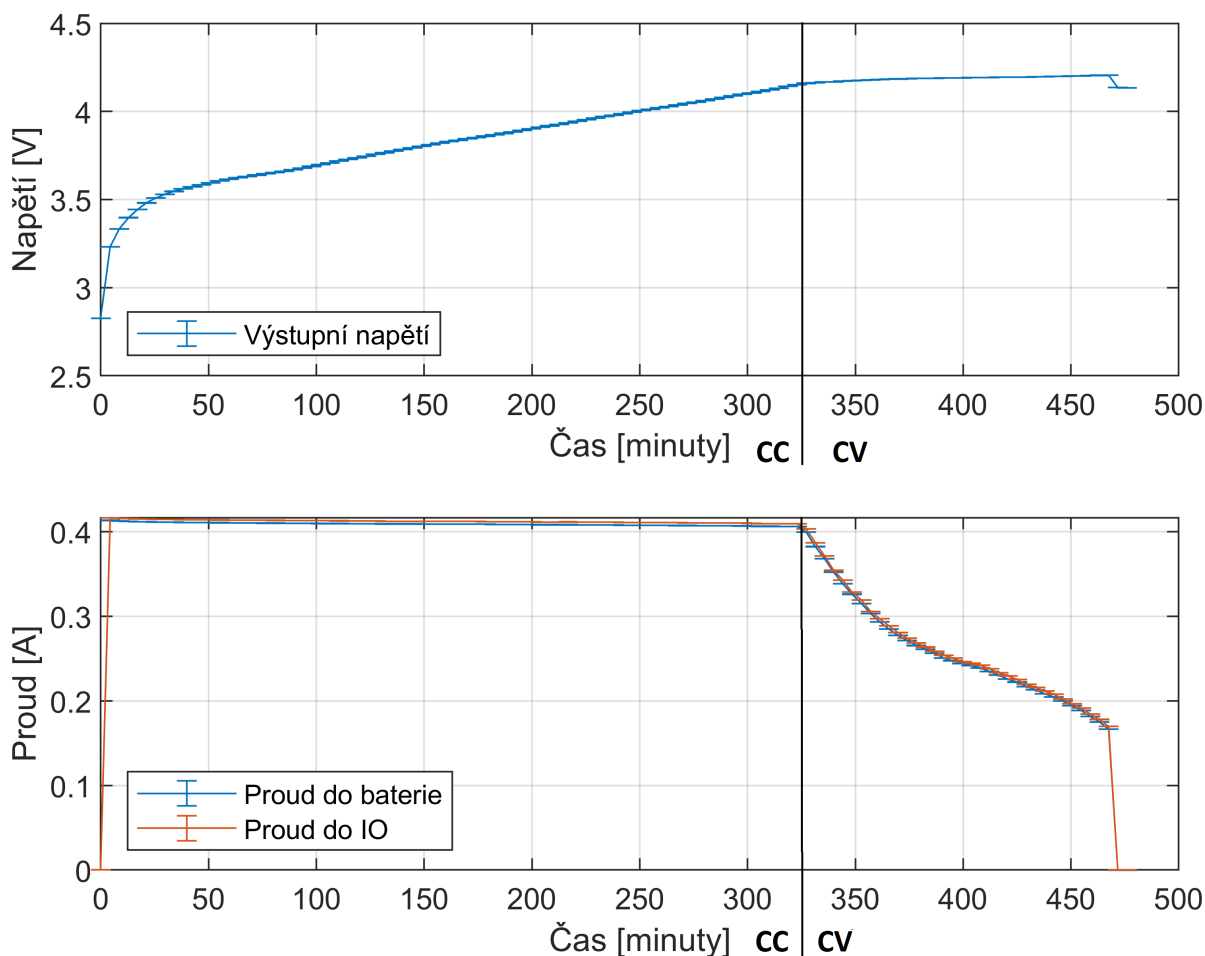
V následující části popisují nejdůležitější charakteristiky a zajímavé body, které obsahují. Další naměřené charakteristiky jsou součástí příloh B - Naměřená data.



Obr. 9.1: Typický nabíjecí cyklus, metoda CC-CV převzato z [9]

Pro srovnání s naměřenými daty zde ještě jednou uvádím typickou nabíjecí charakteristiku.

TP4056



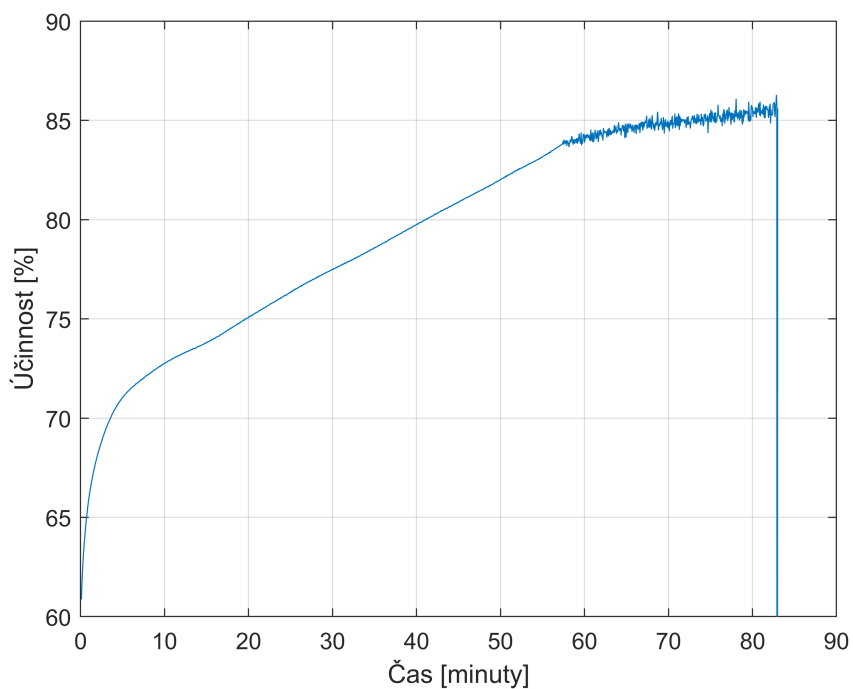
Obr. 9.2: Nabíjecí charakteristika IO TP4056

Podíváme-li se na uvedené průběhy vidíme, že IO dobře kopíroval předpokládanou charakteristiku. Nabíjecí proud, který byl nastaven rezistorem $3k\Omega$ na hodnotu 400mA, byl mírně vyšší (410mA). To je pravděpodobně způsobeno tolerancí rezistoru. Můžeme si všimnout, že nabíjecí proud v průběhu nabíjení v režimu CC mírně klesal. V tomto režimu nabíjel baterii cca 68% nabíjecího cyklu. IO přestal nabíjet na hodnotě 4,205V tedy v rámci jeho tolerance (1,5%).

Charakteristika B.1¹ zobrazuje detailnější pohled na průběh nabíjecího napětí. Modul zastavil nabíjení při vyšší hodnotě napětí (4,225V) v rámci tolerance výrobce.

¹Je součástí příloh

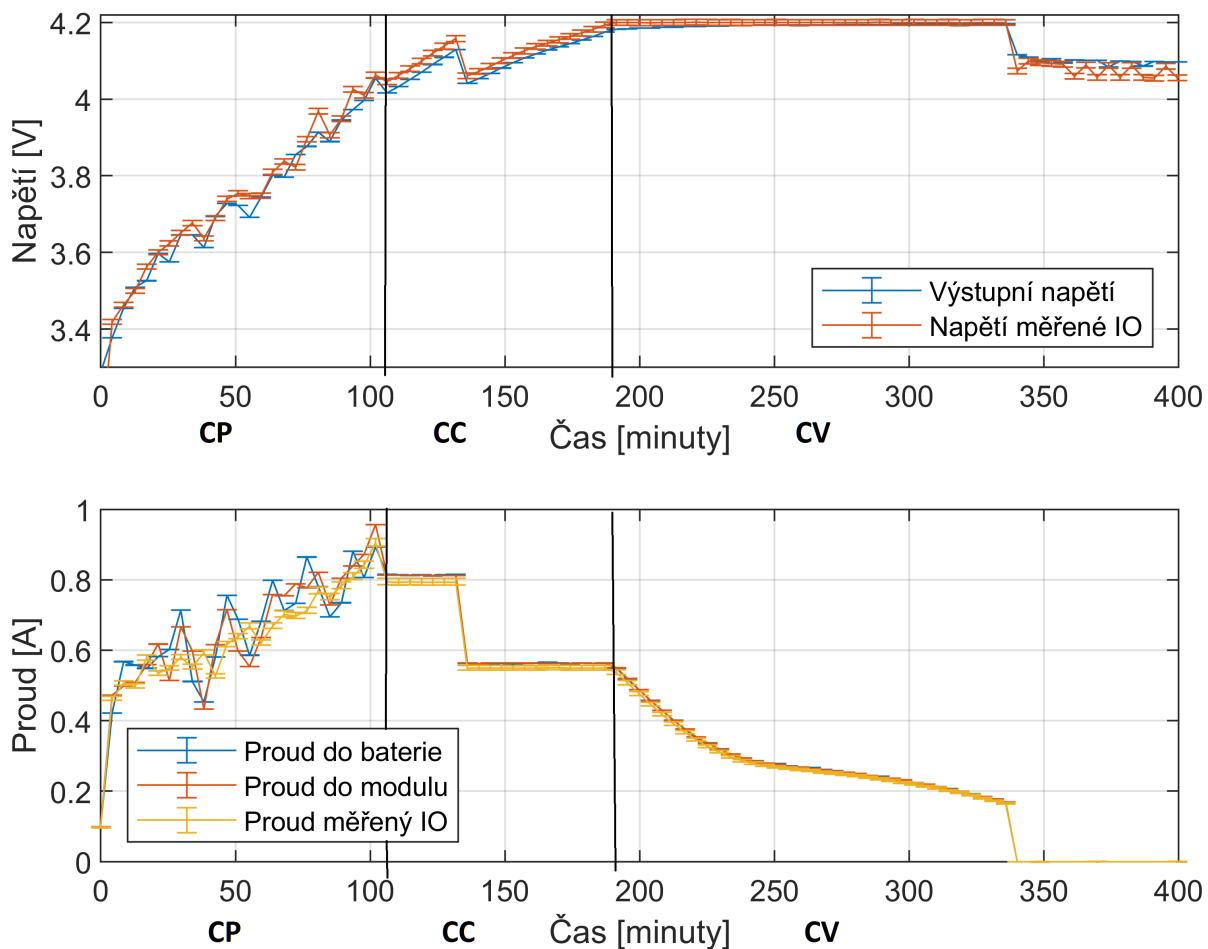
Charakteristika B.2 byla měřena pomocí druhého, jednoduššího modulu, který nedisponuje ochranou proti vybíjení. Provedl jsem měření pro porovnání a z charakteristiky vyplývá, že modul zastavil nabíjení v rámci tolerance výrobce. Je nutné podotknout, že dle tvrzení má být nabíjecí proud 1A viz 7.5. Nejvyšší naměřený proud byl 0,8A. Tato hodnota se neshoduje s údajem výrobce.



Obr. 9.3: Závislost účinnosti na čase IO TP4056

Vidíme že proudy jsou téměř identické, modul tedy není vybaven DC/DC měničem a pouze omezuje napětí. To způsobuje, že s klesajícím proudem a se SOC roste účinnost. Ta je na začátku velmi malá (60%) a postupně roste. Z grafu účinnosti vidíme, že IO dosáhl hodnoty 86% v závěru nabíjecího cyklu.

MAX17330



Obr. 9.4: Nabíjecí charakteristika IO MAX17330

Podíváme-li se na uvedené průběhy vidíme, že IO dobře kopíroval předpokládanou charakteristiku. Nabíjecí proud byl programově nastaven na 1A, nicméně IO nabíjel nižším proudem.

Nabíjecí cyklus je rozdělen do tří hlavních částí.

1. CP (Konstantní výkon - Constant power) ve kterém IO reguluje napětí a proud na konstantní výkon. Výhodou tohoto režimu je lepší regulace s ohledem na teplotu chipu.
2. CC ve kterém IO reguluje na konstantní proud. Z nabíjecí charakteristiky vidíme, že obvod disponuje možností nastavit dvě úrovně konstantního proudu.
3. CV ve kterém IO reguluje na konstantní napětí.

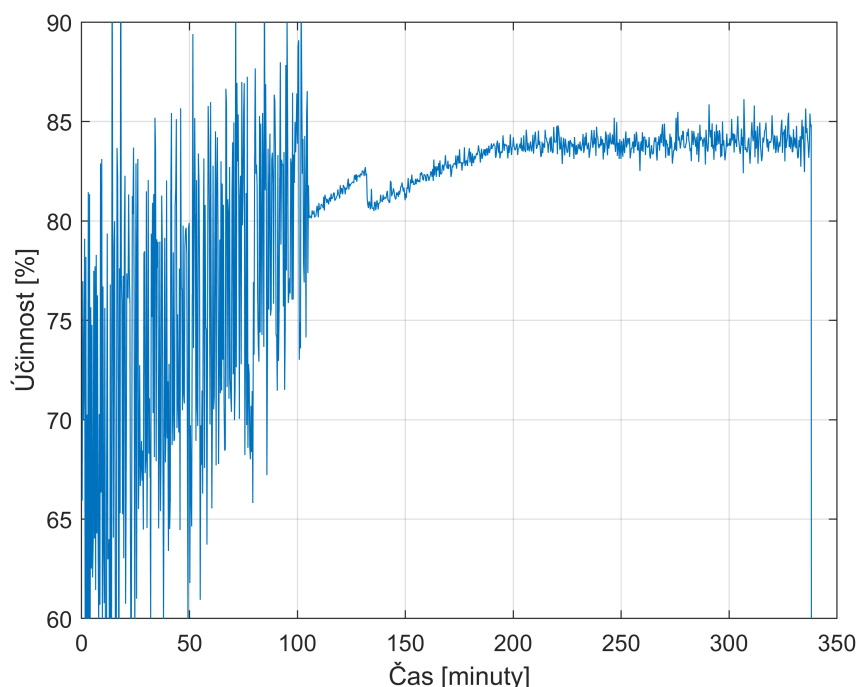
IO přestal nabíjet na hodnotě 4,200V tedy na požadované hodnotě.

Charakteristika B.6 zobrazuje detailnější pohled na průběh nabíjecího napětí. Modul zastavil nabíjení hodnotě napětí (4,198V) v rámci tolerance výrobce.

Charakteristika B.7 zobrazuje detailnější pohled na průběh nabíjecího napětí. Modul zastavil nabíjení hodnotě napětí (4,196V) v rámci tolerance výrobce.

Porovnáme-li tyto tři charakteristiky můžeme říci, že IO dokáže nabíjet velmi přesně na požadovanou hodnotu bez ohledu na nastavený nabíjecí proud.

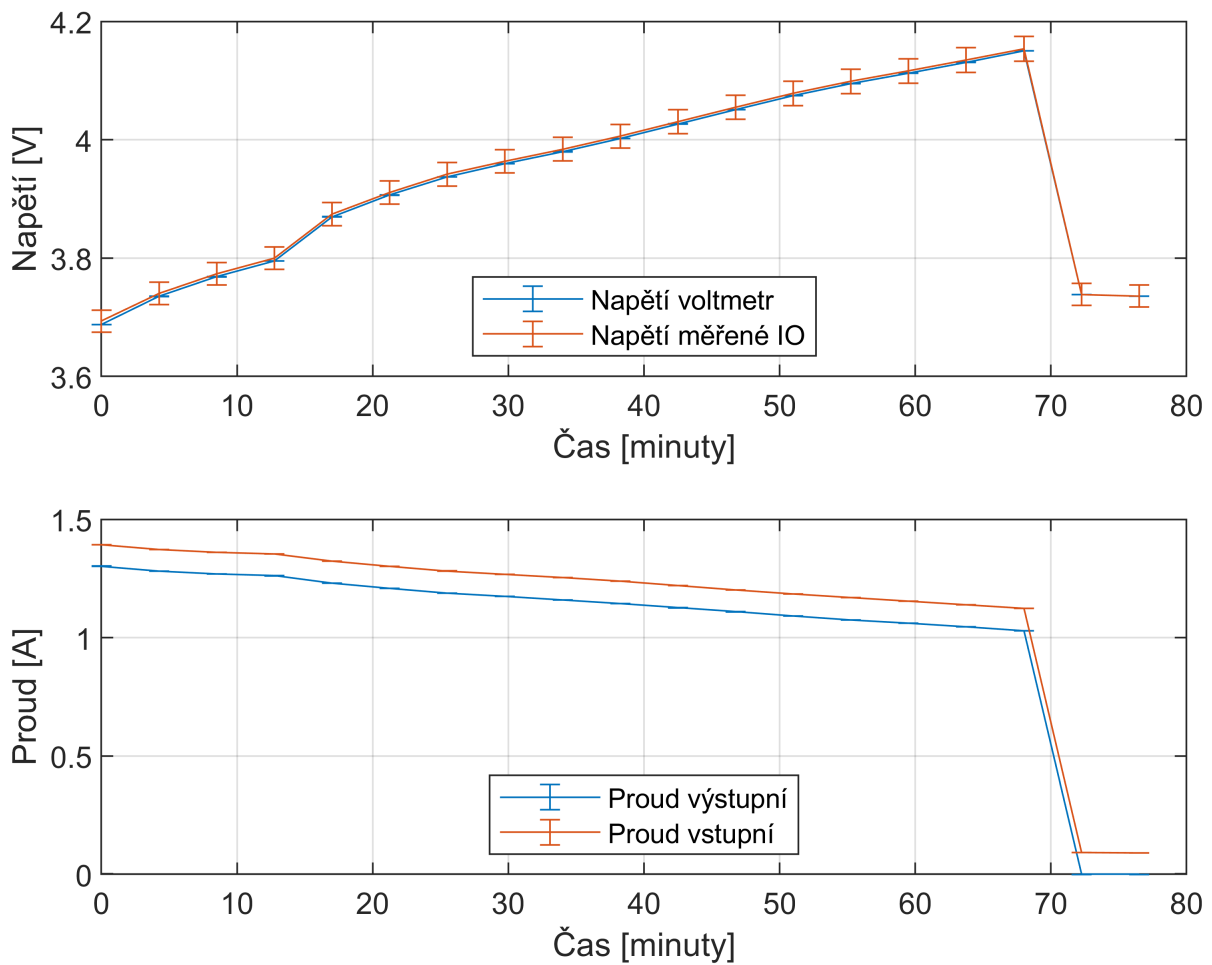
Charakteristika B.8 zobrazuje offset, který vznikal při měření před vytvořením DPS pro minimalizaci parazitních odporů viz 4.3.1. Ten pro proud o velikosti 1A byl 100mV.



Obr. 9.5: Závislost účinnosti na čase IO MAX17330

Modul je vybaven DC/DC měničem. Nicméně vidíme, že se účinnost pohybovala mezi 70% až 84% v závěru nabíjení. Také vidíme, že je průběh značně rozkmitaný a to hlavně v režimu CP. IO aktivně reguluje výkon tak, aby zajistil nízké provozní teploty výkonových tranzistorů.

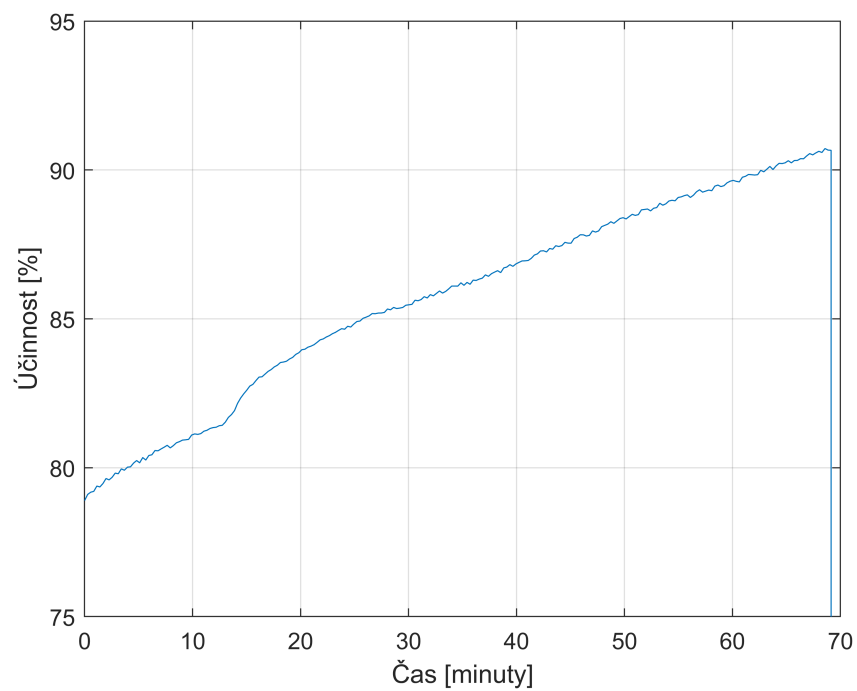
STBC02



Obr. 9.6: Nabíjecí charakteristika IO STBC02

Zajímavostí bylo nabíjení proudem 1,2A, který téměř třikrát překročil výrobcem stanovenou maximální hodnotu 450mA. Proud postupně klesá k hodnotě 1A a IO zastaví nabíjení včas. Vidíme, že IO nekopíroval CC-CV charakteristiku, příčina je neznámá.

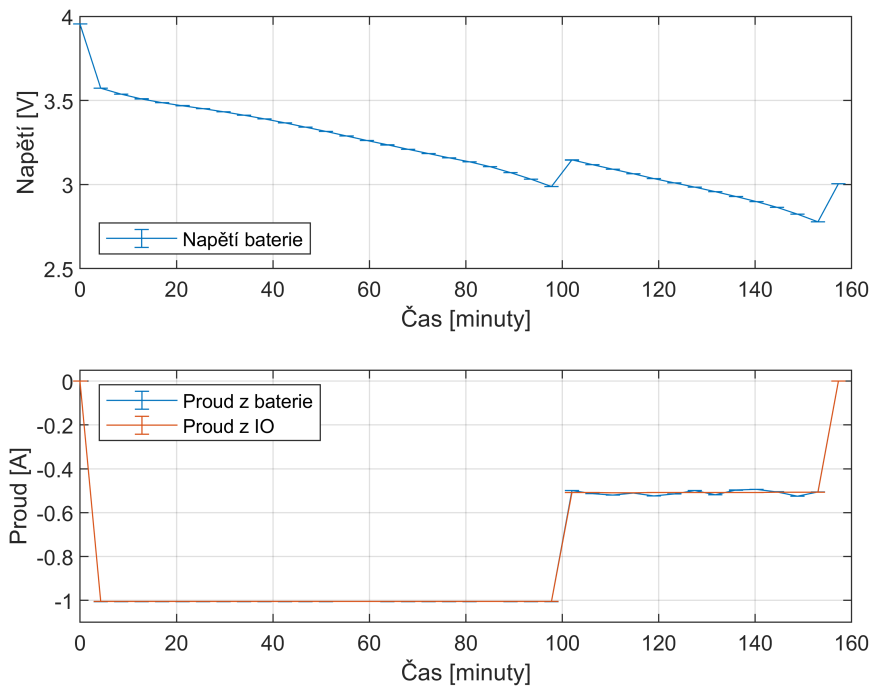
Jako poslední měření jsem provedl nabíjení maximálním proudem 450mA. To muselo být z provozních důvodů laboratoře přerušeno a po pokusu znovu obnovit nabíjení IO přestal fungovat. Jednalo se pravděpodobně o zkrat, protože teplota chipu přesáhla 85°C.



Obr. 9.7: Závislost účinnosti na čase IO STBC02

Modul je vybaven účinným DC/DC měničem. Vidíme, že účinnost IO nabíjení se pohybuje v rozmezí 78% až 92% v závěru nabíjecího cyklu. Vidíme, že i průměrná hodnota je vysoká, tento IO nabíjel baterii velmi efektivně.

BQ25619



Obr. 9.8: Vybíjecí charakteristika IO BQ25619

Vybíjecí charakteristika je zajímavá v tom, že na rozdíl od ostatních IO zajistil BQ25619 regulaci proudu tak, aby nedocházelo k prudkému poklesu napětí baterie. Mezní hodnota napětí baterie byla nastavena na 2,8V přičemž IO nechal baterii vybit na 3V a poté snížil maximální výstupní proud na polovinu. Zátěž byla nastavena na konstantní hodnotu 1A. Při poklesu napětí baterie na mezní hodnotu (2,8V) zajistil IO vypnutí výstupu.

Vzhledem k chybějící nabíjecí charakteristice není účinnost tohoto IO určována.

10 Srovnání integrovaných obvodů

Tato kapitola se věnuje srovnání naměřených dat s daty uváděnými v katalogových listech a na srovnání jednotlivých IO mezi sebou. Pro porovnání naměřených dat volím jako referenční přesnější hodnoty multimetrů.

Obvody pro správu baterií měří řadu parametrů jako jsou napětí, proudy, úrovně nabití, časy nabíjení, teploty atd. Většinu z těchto parametrů však bohužel není možné přímo získat. IO je získávají proto, aby pomocí nich lépe řídily nabíjení a vybíjení baterie. Zejména pokročilé chipy jsou zpravidla součástí komplexnějšího systému s nadřazeným mikrokontrolerem. Ten dokáže hodnotu např. nabíjecího proudu změnit, ale nemá zpětnou vazbu o aktuální hodnotě.

10.1 Přesnost nabíjecího napětí

Přesnosti, s jakou IO měří napětí baterie se v průběhu nabíjení mění. S klesajícím proudem v režimu CV se jejich přesnost zvyšuje a obvody postupně regulují na nabíjecí napětí (4,2V).

TP4056

Pokud porovnáme naměřená data viz 9.2 vidíme, že s klesajícím proudem se zvyšovala přesnost až na hodnotu tolerance, udávanou v tabulce 7.1. Naměřená data se shodují s údaji udávanými výrobcem.

MAX17330

Pokud porovnáme naměřená data chipu viz 9.4 s hodnotami multimetrů vidíme, že s klesajícím proudem se zvyšovala přesnost až na hodnotu tolerance, udávanou v tabulce 7.1. Naměřená data se shodují s údaji udávanými výrobcem.

STBC02

V příloze B.12 můžeme vidět charakteristiku nabíjení proudem 100mA. IO ukončil nabíjení na hodnotě 4,200V. Naměřená data se shodují s údaji udávanými výrobcem.

10.2 Vybíjecí charakteristika

TP4056

Pokud porovnáme charakteristiky vybíjení tohoto IO B.3, B.4, B.5 vidíme, že s rostoucím vybíjecím proudem se snižovalo napětí, při kterém IO odpojil baterii. Modul disponuje ochranným obvodem DW01A, který má práh detekce nastavený na $2,4V \pm 0,1V$ [21]. To je pro baterii velmi nízká hodnota, která nicméně nepřekračuje mezní parametry. Ochranný obvod reagoval v nejhorším případě na hodnotě 2,5V tedy v rámci tolerance.

MAX17330

Pokud porovnáme charakteristiky vybíjení tohoto IO B.9, B.10, B.11 vidíme, že s rostoucím vybíjecím proudem se snižovalo napětí, při kterém IO odpojil baterii. Charakteristiky začínají posunem několika prvních vzorků. To je způsobenou nutností postupně zvyšovat proud tak, aby nedošlo k předčasné aktivaci ochrany proti podbití. Vybíjení proudem 3A je na hranici možností, které je vzhled k limitům možné viz 7.2.3. IO zvládl vybíjení správně. Vypínací napětí i vybíjecí proud je možné nastavit v příslušných registrech.

STBC02

V příloze B.13 můžeme vidět vybíjecí charakteristiku tohoto IO. Ten odpojil baterii na hodnotě 2,548V tedy pod úroveň stanovenou výrobcem ($2,8 \pm 0,05V$) [13]. Dále vidíme, že se proud z baterie liší od proudu z modulu a to po celou dobu vybíjení. Rozdíl může být způsoben DC-DC měničem. Naměřená data se neshodují s údaji výrobce.

BQ25619

Vybíjecí charakteristika 9.8 je popsána v části 9. Naměřená data se shodují s údaji uváděnými výrobcem.

10.3 Ochrana napětí baterie

Všechny IO v sobě integrují základní ochrany proti nízkému a vysokému napětí článku ($2,5V - 4,2V$)¹. Z naměřených charakteristik je možné jednoduše identifikovat místa jejich aktivací a naměřená data zhodnotit. Pokročilé IO mají spoušť těchto ochranných nastavitelnou. Z naměřených dat vyplývá, že všechny IO vyhovují požadavkům na odpojení

¹TP4056 ve verzi s přidáním externími IO

baterie. Nicméně IO TP4056 má ochranu proti podbití nastavenou velmi nízko a při vybití na dolní mez tolerance by mohlo dojít k poškození baterie. IO STBC02 vypnul baterii včas, ale mimo toleranci výrobce.

10.4 Účinnost

Účinnost je důležitým parametrem pro srovnání IO. Pokud porovnáme naměřená data v kapitole 9 vidíme, že nejvyšší účinnosti dosáhl IO STBC02 a to 92%. Druhým nejúčinnějším byl IO TP4056(86%) a třetím IO MAX17330(84%). Pro obvod BQ25619 jsem účinnost nevyhodnocoval viz kapitola 9. Nicméně k dosaženým výsledkům je třeba podotknout, že MAX17330 měl průměrnou účinnost vyšší než TP4056, a proto ho považuji za účinnější. To potvrzuje předpoklad, že dražší a propracovanější IO, vybavené DC-DC měniči, budou využívat energii lépe a nabíjet efektivněji.

10.5 Přesnost stanovení kapacity

Stanovení kapacity IO je klíčovým parametrem pro správné nabíjení a vybíjení baterií. Všechny IO implementují metodu Coulomb counting popsanou v části 1.2.1. Tato metoda je založena na měření proudu, který se v čase integruje.

MAX17330

Nejlépe to jde vidět v případě IO MAX17330, který má odchylky od hodnoty měřené ampérmetrem až 60mA. Z této hodnoty se pak integrací spočítá nepřesná průběžná hodnota kapacity. Nicméně díky přepnutí z režimu CP do CC a CV dochází k postupnému zpřesňování SOC. IO ukončí nabíjení velmi přesně na stanovené hodnotě. Rozdíl je patrný na i vybíjecích charakteristikách, kde s rostoucím proudem klesala přesnost určování kapacity baterie. Naměřené hodnoty se shodují s údaji výrobce.

STBC02

Z charakteristik B.12 vyplývá, že při nabíjení dokáže IO měřit kapacitu přesně a regulovat na 100% SOC. Při vybíjení B.13 je patrná odchylka od tolerance výrobce a pozdní reakce odpojení baterie. To je pravděpodobně způsobeno chybně určenou kapacitou.

BQ25619

Z vybíjecí charakteristiku chipu viz 9.8 je patrné, že odchylka měřené kapacity je v rámci tolerance stanovené výrobcem.

TP4056

Vzhledem k jeho vyšším tolerancím (1,5%) a vyšší odchylce v mezních stavech je jasné, že IO stanovuje kapacitu nejhůře z vybrané skupiny IO - dle předpokladu. Rozdíly jsou patrné při nabíjení i vybíjení, naměřená data se shodují s údaji výrobce.

Závěr

Bakalářská práce je orientována do oblasti výběru, programování a měření integrovaných obvodů pro správu Li-ion baterií typu 18650. Cílem práce bylo proměřit parametry těchto obvodů.

Existuje velké množství integrovaných obvodů, které splňují podmínky zadání. Tyto IO můžeme rozdělit do dvou velkých skupin viz kapitola 2. Postupným výběrem pomocí kritérií viz kapitola 3 jsem vybral čtyři zástupce, které jsem oživil a proměřil. Základní IO TP4056 a pokročilé IO BQ25619, MAX17330 a STBC02.

Provedl jsem sérii měření viz 7.2, které měly za cíl ověřit přesnosti IO v oblasti určování kapacity. Také jsem ověřil funkce ochrany, proměřil jsem nabíjecí a vybíjecí charakteristiky a z naměřených dat určil účinnosti. Nejdůležitějšími parametry jsou minimální a maximální povolené napětí článku (2,5V - 4,2V). Integrované obvody svojí regulací aktivně zajišťují udržení baterie v těchto mezích, pomocí průběžného měření stavu nabití baterie. Pro srovnání IO je také vhodné stanovit účinnost každého IO. Ověřování měřených dat jsem prováděl pomocí dostupných multimetrů viz 7.3.

Shrnuli dosažené výsledky měření, všechny chipy dokázaly udržet baterii v mezních hodnotách baterie tabulka 1.2. Přesnost stanovení kapacity vyplývá z naměřených dat kap. 9. Ty se shodují s údaji výrobců a jsou v rámci jejich tolerancí 7.1. Nejnižší tolerance z plně oživených IO měl chip MAX17330, který reguloval napětí nejlépe z dostupných IO. Integrovaný obvod STBC02 při vybíjení odpojil baterii při nižším napětí, než je hodnota stanovená výrobcem viz 10.2 a tedy mimo toleranci chipu.

Pokud porovnáme účinnosti IO (10.4) můžeme říci, že nejvyšší celkové účinnosti dosáhl IO STBC02 a to 92%. Druhým nejúčinnějším byl IO TP4056 (86%) a třetím IO MAX17330 (84%). Pro obvod BQ25619 jsem účinnost nevyhodnocoval viz kapitola 9. Nicméně k dosaženým výsledkům je třeba podotknout, že MAX17330 měl průměrnou účinnost vyšší než TP4056, a proto ho považuji za efektivnější.

Pokročilé IO se vyznačují vyšší přesností, lepší účinností a schopností komunikovat s nadřazeným systémem. Mezi sebou se liší maximálními nabíjecími proudy viz 7.2.3, přesností stanovení kapacity viz 10.5 i účinností viz 10.4. Základní chipy komunikovat nedokáží, mají nižší přesnost i účinnost. Výhodou je pak jejich nižší cena a jednoduchost použití. Proto výběr vhodného integrovaného obvodu závisí na konkrétní aplikaci.

Literatura

- [1] Lithium-ion battery. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery
- [2] BEARD, Kirby W. a Thomas B. REDDY, ed. *Linden's handbook of batteries*. Fifth edition. New York: McGraw-Hill, [2019]. ISBN isbn9781260115925.
- [3] VANZWOL, Jeffrey. *The Lithium-Ion Cells and Chemistries You Need to Know* [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/power-management/whitepaper/21156693/green-cubes-technology-the-lithiumion-cells-and-chemistries-you-need-to-know>
- [4] Samsung INR18650-30Q 3000mAh. In: *Baltrade* [online]. [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://shop.baltrade.eu/436,18650_rechargeable_Li_ion_battery__Samsung_INR18650_30Q__3000mAh
- [5] SAMSUNG SDI., ENERGY BUSINESS DIVISION. *SPECIFICATION OF PRODUCT: INR18650-30Q* [online]. 2015 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/accu-inr18650-30q/akumulatory/samsung-sdi/inr18650-30q/>
- [6] REZVANIZANIANI, Seyed Mohammad, Zongchang LIU, Yan CHEN a Jay LEE. Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of Power Sources* [online]. 2014, **256**, 110-124 [cit. 2022-10-28]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2014.01.085
- [7] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, INC. *MAX17330: AccuCharge + ModelGauge 1-Cell Charger, Fuel Gauge, and Protector* [online]. 21/5. 2021, 158 s. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/max17330.html#product-overview>
- [8] BU-402: What Is C-rate?. *Battery university* [online]. 2021 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate>
- [9] MIAO, Yu, Patrick HYNAN, Annette VON JOUANNE a Alexandre YOKOCHI. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies* [online]. 2019, **12**(6) [cit. 2022-11-05]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12061074

- [10] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MCP73833/4: Stand-Alone Linear Li-Ion / Li-Polymer Charge Management Controller* [online]. Revision B (May 2009). 2006, 32 s. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP73833>
- [11] Power management integrated circuit. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_management_integrated_circuit
- [12] *BQ25618/619 I2C Controlled 1-Cell 1.5-A Battery Charger with 20-mA Termination and 1-A Boost Operation* [online katalogový list]. Rev.2021. Texas Instruments, 2019 [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/new/texas-instruments/ti-bq25619-battery-charger/>
- [13] STMICROELECTRONICS. *STBC02: Li-Ion linear battery charger with LDO, load switches and reset generator* [online]. 28.2.2022. 35 s. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/power-management/stbc02.html>
- [14] STMICROELECTRONICS. *STM32F303x6/x8: Arm®Cortex®-M4 32b MCU+FPU, up to 64KB Flash, 16KB SRAM, 2 ADCs, 3 DACs, 3 comp., op-amp 2.0 - 3.6 V* [online]. 16.6.2018. 124 s. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f3-series/stm32f303/stm32f303k8.html#overview. Verze 8.
- [15] Otevřený kolektor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Otev%C5%99en%C3%BD_kolektor
- [16] AFZAL, Sal. I2C Primer: What is I2C?: (Part 1). *Analog Devices* [online]. [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/i2c-primer-what-is-i2c-part-1.html#author>
- [17] GW INSTEK. *MULTIPLE OUTPUT PROGRAMMABLE LINEAR D.C. POWER SUPPLY* [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/gpd-3303s/programovatelne-napajeci-zdroje/gw-instek/>
- [18] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *34410A and 34411A Multimeters* [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z:

<https://www.keysight.com/us/en/product/34410A/digital-multimeter-6-digit.html>

- [19] NANJING TOP POWER ASIC CORP. *TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <http://www.tp4056.com/datasheet/>
- [20] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *34450A Multimeter 5.5 Digit Dual Display, Benchtop DMM* [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/support/34450A/digital-multimeter-5-5-digit-oled-display.html>
- [21] *Nabíječka Li-ion článku TP4056 s ochranou microUSB* [online]. In: . [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/nabijecka-li-ion-clanku-tp4056-s-ochranou-microusb/>

Seznam symbolů a zkratek

Li-ion Lithium iontové baterie

SOC Úroveň nabití [%] - State of charge

PMIC Obvody pro správu napájení - Power management integrated circuit

I2C Vnitřní integrovaná sběrnice - Inter-Integrated Circuit

IO Integrovaný obvod

DPS Deska plošného spoje

LDO Regulátor s nízkým úbytkem napětí - Low-dropout regulator

S.N. Sériové číslo - Serial number

ADC A/D převodníku - Analog to digital converter

CC Konstantní proud - Constant current

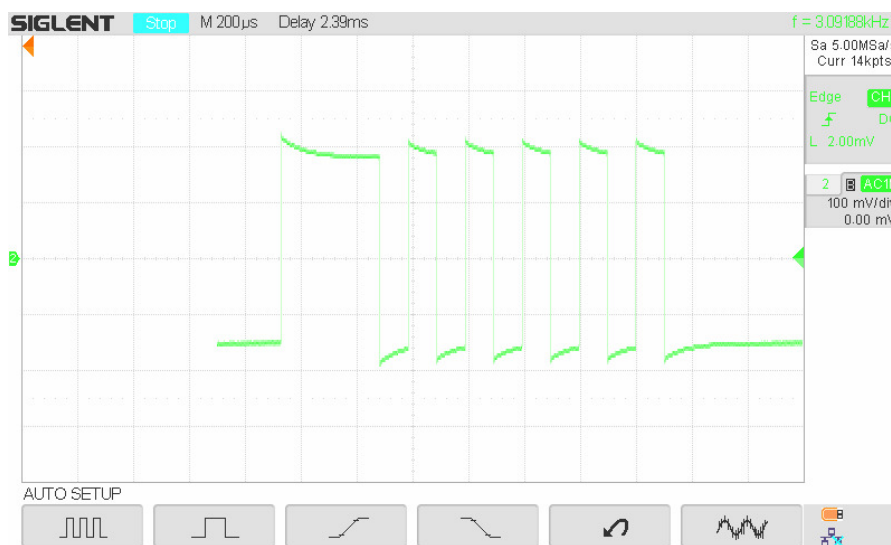
CV Konstantní napětí - Constant voltage

CP Konstantní výkon - Constant power

Seznam příloh

A Snímek obrazovky osciloskopu	70
B Naměřená data	71
C Obsah elektronické přílohy	78

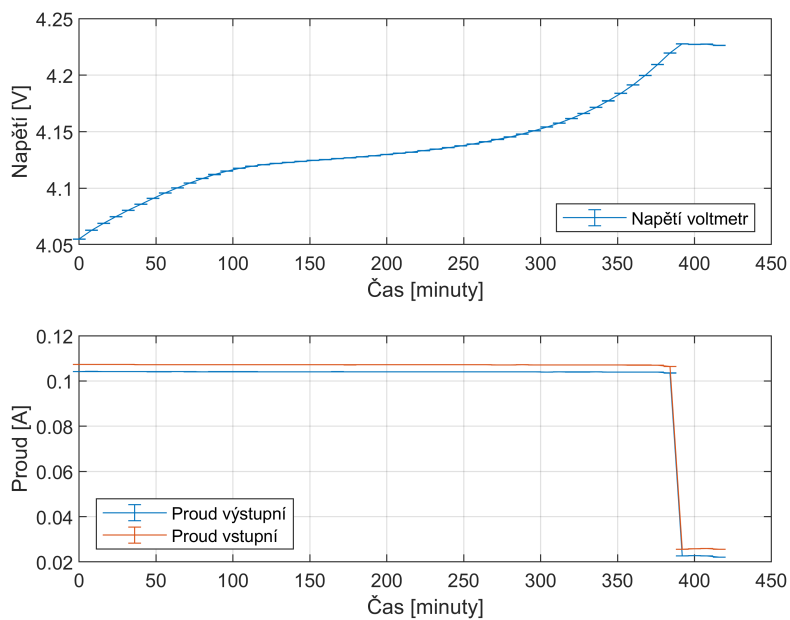
A Snímek obrazovky osciloskopu



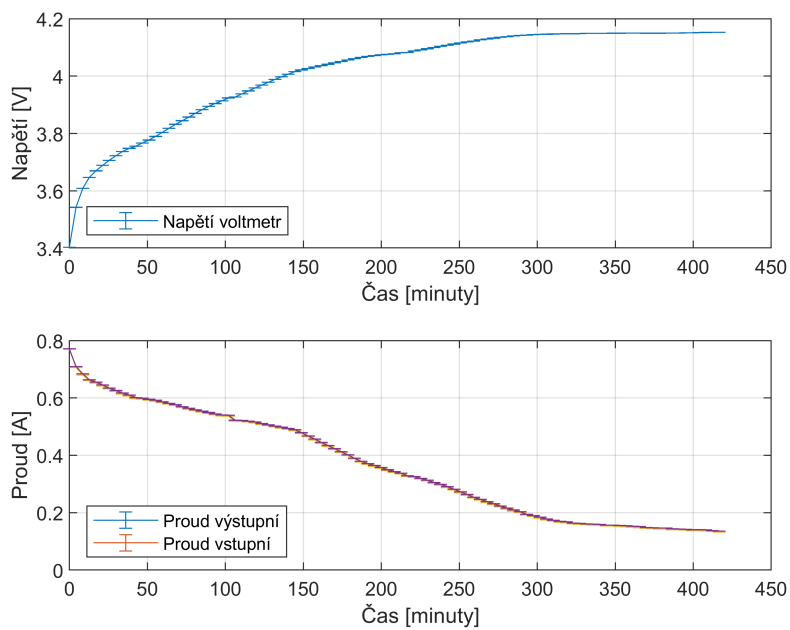
Obr. A.1: 1-Wire, implementovaný bitstream

B Naměřená data

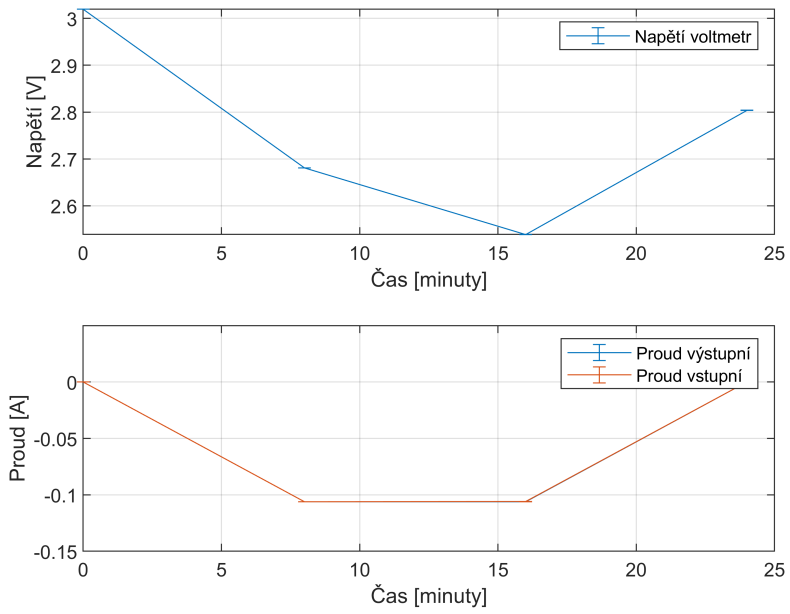
TP4056



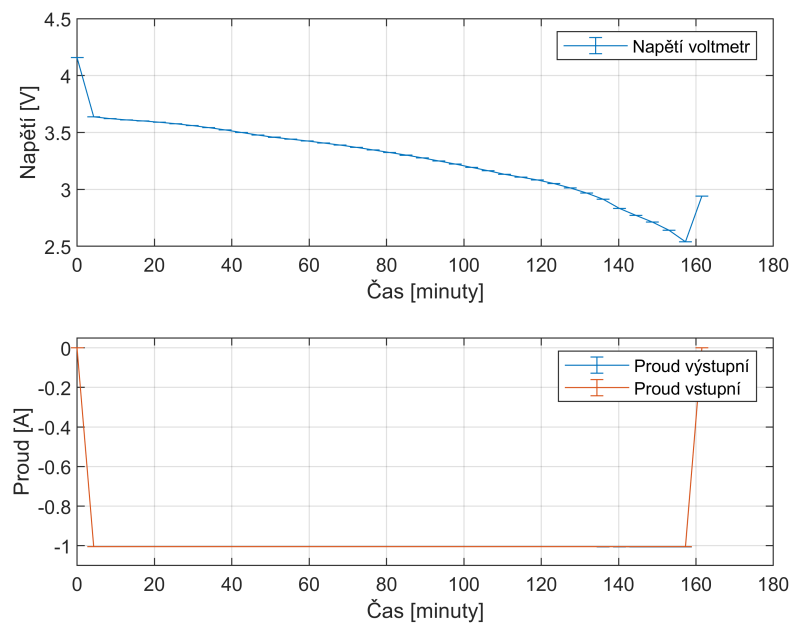
Obr. B.1: Nabíjecí charakteristika 100mA, IO TP4056



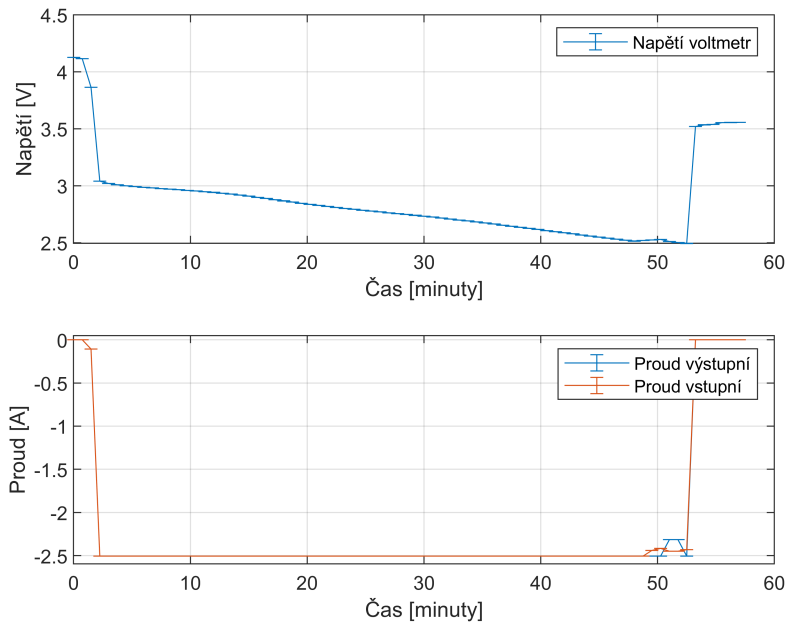
Obr. B.2: Nabíjecí charakteristika 780mA, IO TP4056



Obr. B.3: Vybíjecí charakteristika a reakce ochrany 100mA, IO TP4056

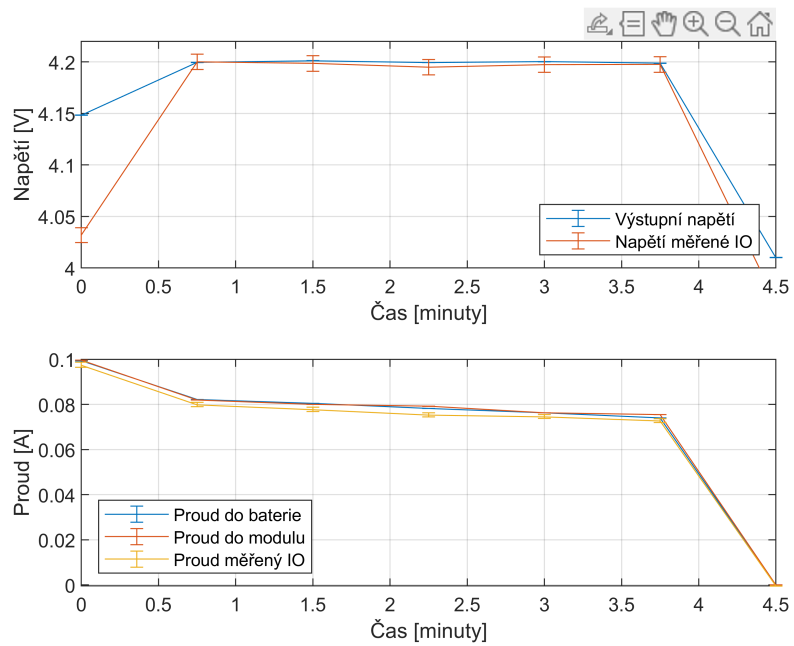


Obr. B.4: Vybíjecí charakteristika a reakce ochrany 1A, IO TP4056

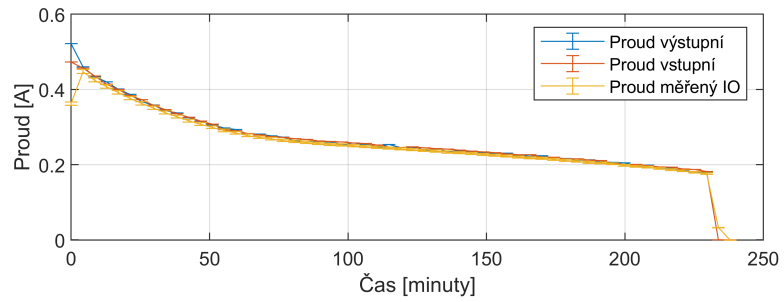
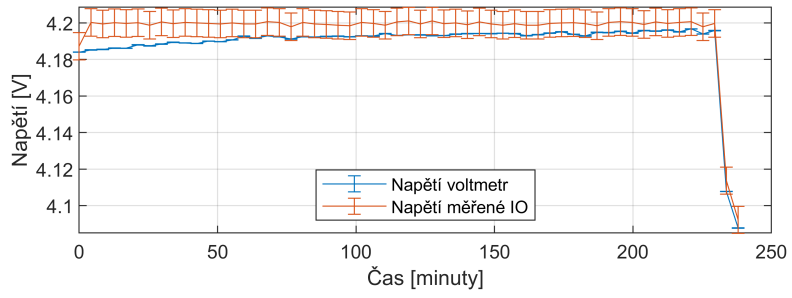


Obr. B.5: Vybíjecí charakteristika a reakce ochrany 2,5A, IO TP4056

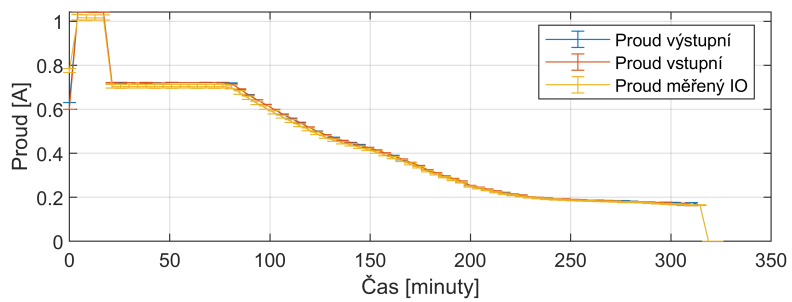
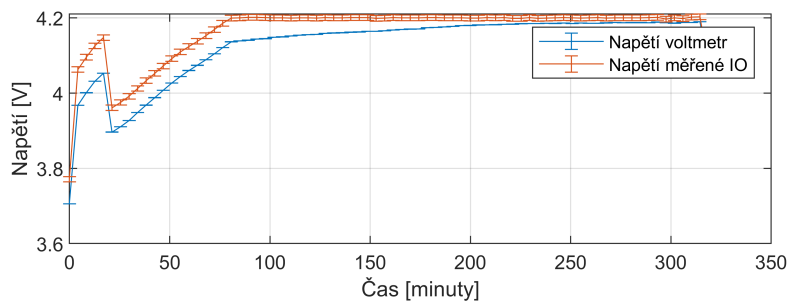
MAX17330



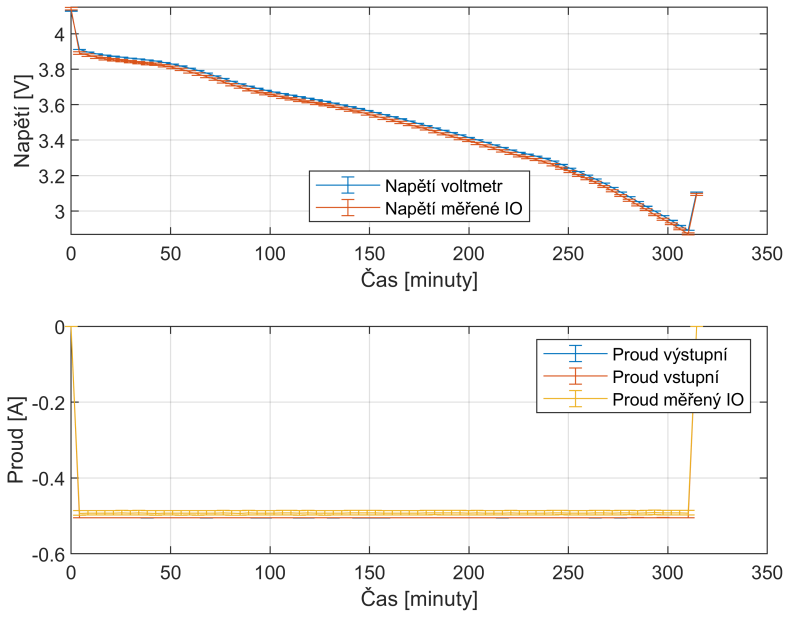
Obr. B.6: Nabíjecí charakteristika 100mA, IO MAX17330



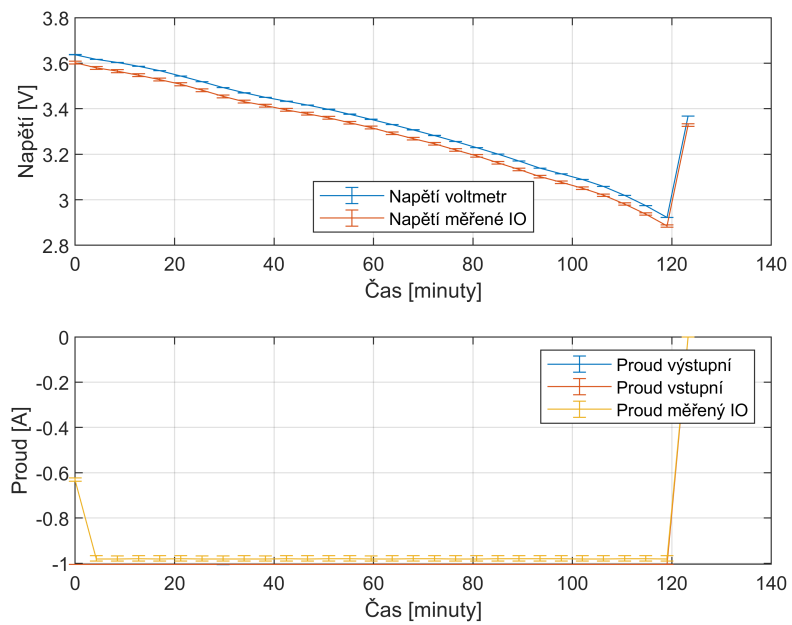
Obr. B.7: Nabíjecí charakteristika 500mA, IO MAX17330



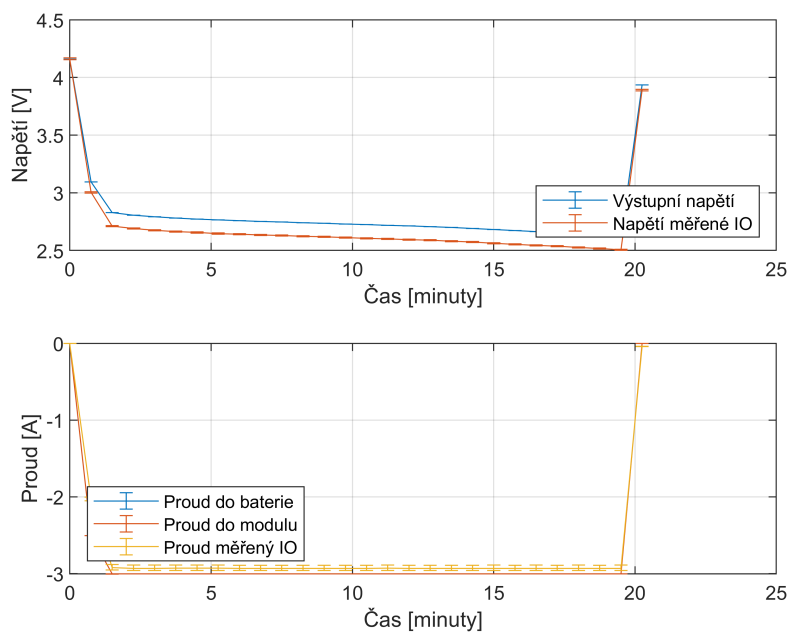
Obr. B.8: Nabíjecí charakteristika offset, IO MAX17330



Obr. B.9: Vybíjecí charakteristika 500mA, IO MAX17330

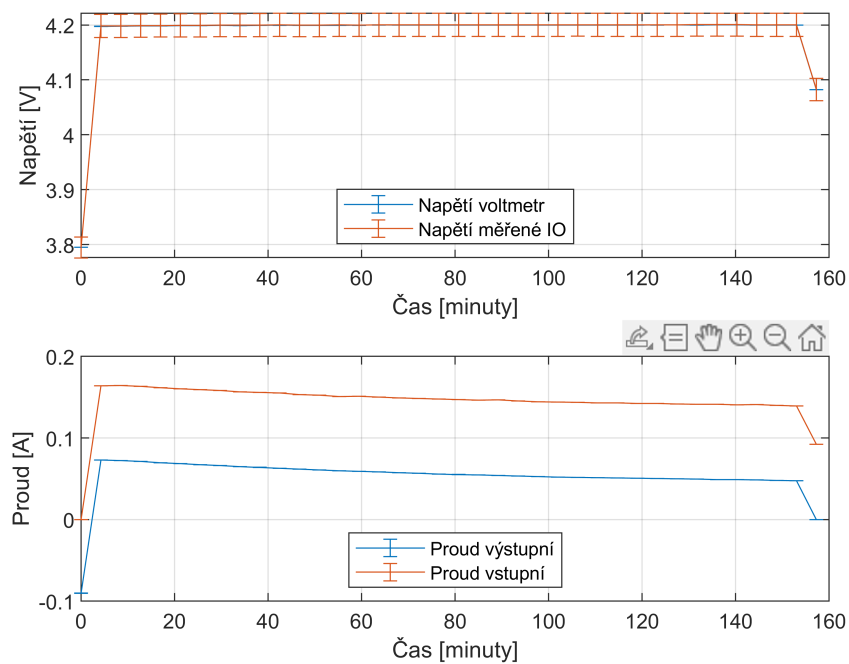


Obr. B.10: Vybíjecí charakteristika 1A, IO MAX17330

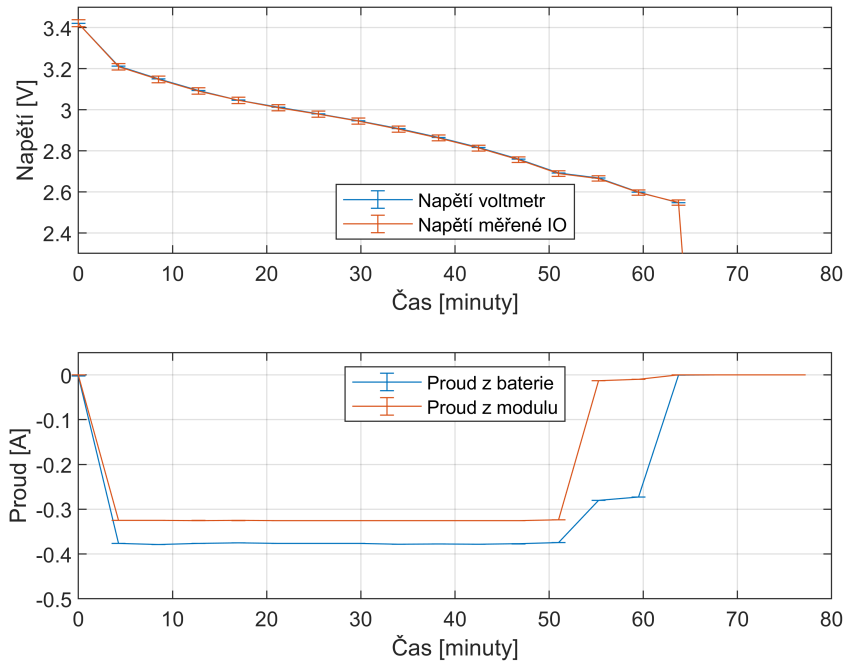


Obr. B.11: Vybíjecí charakteristika 3A, IO MAX17330

STBC02



Obr. B.12: Nabíjecí charakteristika 100mA, IO STBC02



Obr. B.13: Vybíjecí charakteristika, IO STBC02

C Obsah elektronické přílohy

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého archivu
├── Readme
├── Naměřená data ..... adresáře obsahují naměřená data ve formátu csv
│   ├── BQ25619
│   ├── MAX17330
│   ├── STBC02
│   └── TP4056
├── Navržená DPS ..... adresář obsahuje zdrojová data DPS a seznam součástek
├── Program Labview ..... adresář obsahuje zdrojová VI
├── Program Matlab ..... adresář obsahuje Matlab scripty
└── Program STM ..... adresář obsahuje export vytvořeného projektu
```