

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra materiálů a technologií

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Monitorování baterií pro IoT zařízení

Autor práce: Bc. Jan Handrejch  
Vedoucí práce: Ing. Jiří Čengery PhD.

---

Plzeň 2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan HANDREJCH**  
Osobní číslo: **E20N0004P**  
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**  
Téma práce: **Monitorování baterií pro IoT zařízení**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

## Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši používaných baterií a metod pro monitorování jejich kapac při dlouhodobém provozu IoT zařízení.
2. Proveďte rešerši dostupných integrovaných řešení na současném trhu. Pro vybrané obvody a metody proveďte srovnání.
3. Navrhněte srovnávací experiment pro který realizujte testovací přípravky.
4. Proveďte měření a vyhodnoťte dosažené výsledky..

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Internetové zdroje dodavatelů a výrobců baterií např. Farnell, Digikey, Eve, Saft, ...
2. Internetové zdroje předních výrobců integrovaných obvodů, např. Texas Instrument, Analog Devices, Maxim, Microchip...

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Čengery, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



L.S.

**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

**Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 26. května 2022

Bc. Jan Handrejch

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou monitorování zbývající energie zejména v primárních člancích na bázi Lithium-Thionylchloridu ( $\text{Li-SOCl}_2$ ), které nachází své uplatnění v nízkoenergetických IoT zařízeních. Účelem této práce je výběr a validace vhodných integrovaných obvodů pro aplikační nasazení do této oblasti. V teoretické části se nejprve zaměříme na úvod do povědomí o Internetu věcí (IoT) a zde využívaných bezdrátových sítí. Jako příklad nízkoenergetického IoT zařízení je v práci uvedena a popsána platforma KETCube. Dále je zde zpracován popis primárních baterií a využitelné metody pro získání informací o zbývající energii a kapacitě. V rámci uceleného přehledu zde zmíníme také *Energy harvesting*. Praktická část práce je věnována návrhu a realizaci desek plošných spojů pro řešené integrované obvody. Pro veškeré vytvořené elektronické obvody je následně provedeno měření s vyhodnocením získaných výsledků.

## Klíčová slova

IoT, KETCube, monitorování baterií, predikce zbývající energie, SOH, SOC, primární baterie,  $\text{Li-SOCl}_2$ , LoRa, Sigfox, NB-IoT, vizualizace dat, deska plošných spojů.

## Abstract

The thesis deals with the issue of monitoring the remaining energy, especially in primary cells based on Lithium-Thionyl Chloride (Li-SOCl<sub>2</sub>), which find their application in low-power IoT devices. The purpose of this work is to select and validate suitable integrated circuits for application deployment in this area. In the theoretical part, we first focus on an introduction to the Internet of Things (IoT) and the wireless networks used here. As an example of a low-power IoT device, the KETCube platform is presented and described in this thesis. Furthermore, a description of primary batteries and usable methods for obtaining information about the remaining energy and capacity are elaborated. As part of a comprehensive overview, *Energy harvesting* is also mentioned here. The practical part of the thesis is devoted to the design and implementation of printed circuit boards for the researched integrated circuits. For all the designed electronic circuits, measurements are subsequently performed with evaluation of the obtained results.

## Key words

IoT, KETCube, battery monitoring, predicting remaining energy, primary cells, Li-SOCl<sub>2</sub>, SOH, SOC, LoRa, Sigfox, NB-IoT, data visualization, printed circuit board.

## Poděkování

Velice rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Čengerymu PhD. za poskytnuté konzultace, výborné vedení práce, přínosné rady a pomoc při jejím vypracování.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Koncept</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Internet of Things - IoT</b>	<b>15</b>
3.1	Zařízení . . . . .	16
3.2	Brány . . . . .	16
3.3	Komunikace . . . . .	16
3.4	Industrial Internet of Things - IIoT . . . . .	17
3.5	Internet of Medical Things - IoMT . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Bezdrátové komunikační technologie v IoT</b>	<b>19</b>
4.1	LoRa™ . . . . .	21
4.2	Sigfox . . . . .	22
4.3	NB-IoT . . . . .	23
4.4	Porovnání LoRa, Sigfox, NB-IoT . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Drátové komunikační sběrnice</b>	<b>28</b>
5.1	Paralelní komunikace . . . . .	28
5.2	Sériová komunikace . . . . .	29
5.2.1	I <sup>2</sup> C . . . . .	30
5.2.2	I <sup>3</sup> C . . . . .	31
5.2.3	SPI . . . . .	32
<b>6</b>	<b>KETCube®</b>	<b>35</b>
6.1	Hardware . . . . .	36
6.2	Firmware . . . . .	37
<b>7</b>	<b>Energy harvesting</b>	<b>39</b>
7.1	Metody získávání energie . . . . .	40
7.1.1	<i>Harvesting</i> okolní energie . . . . .	41
7.1.2	<i>Harvesting</i> mechanické energie . . . . .	41



7.1.3	<i>Harvesting</i> energie lidského těla . . . . .	43
7.1.4	Bioenergetický <i>harvesting</i> . . . . .	44
7.1.5	Hybridní <i>energy harvesting</i> . . . . .	44
<b>8</b>	<b>Primární baterie</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Metody pro určení stavu baterií</b>	<b>49</b>
9.1	<i>State of Charge (SOC)</i> . . . . .	49
9.1.1	<i>Direct measurement</i> . . . . .	50
9.1.2	<i>Book-keeping estimation</i> . . . . .	52
9.1.3	<i>Adaptive systems</i> . . . . .	53
9.1.4	<i>Hybrid methods</i> . . . . .	54
9.2	<i>State of Health (SOH)</i> . . . . .	55
9.2.1	<i>Internal Resistance Measurement</i> . . . . .	56
9.2.2	<i>Internal Impedance Measurement</i> . . . . .	57
9.2.3	<i>Model-based method</i> . . . . .	57
9.2.4	<i>Data-driven method</i> . . . . .	58
<b>10</b>	<b>Rešerše vybraných integrovaných obvodů</b>	<b>59</b>
10.1	LTC3335 . . . . .	60
10.2	LTC3337 . . . . .	61
10.3	BQ35100 . . . . .	62
<b>11</b>	<b>Rešerše vybraných primárních článků Li–SOCl<sub>2</sub></b>	<b>65</b>
<b>12</b>	<b>Praktická realizace</b>	<b>68</b>
12.1	Návrh DPS . . . . .	68
12.1.1	Návrh s LTC3335 . . . . .	69
12.1.2	Návrh s LTC3337 . . . . .	70
12.1.3	Návrh s BQ35100 . . . . .	71
12.1.4	Realizace a výroba DPS . . . . .	73
12.2	Softwarová obsluha . . . . .	75
12.2.1	Výpočet parametrů u jednotlivých IO . . . . .	76
12.3	Návrh měřicího systému a měření . . . . .	79
12.4	Naměřené hodnoty . . . . .	81

12.4.1 LTC3335 . . . . .	81
12.4.2 LTC3337 . . . . .	82
12.4.3 BQ35100 . . . . .	83
12.4.4 Celkové porovnání . . . . .	84
<b>13 Závěr</b>	<b>87</b>
<b>Literatura</b>	<b>90</b>
<b>A Přílohy</b>	<b>102</b>

# 1 Úvod

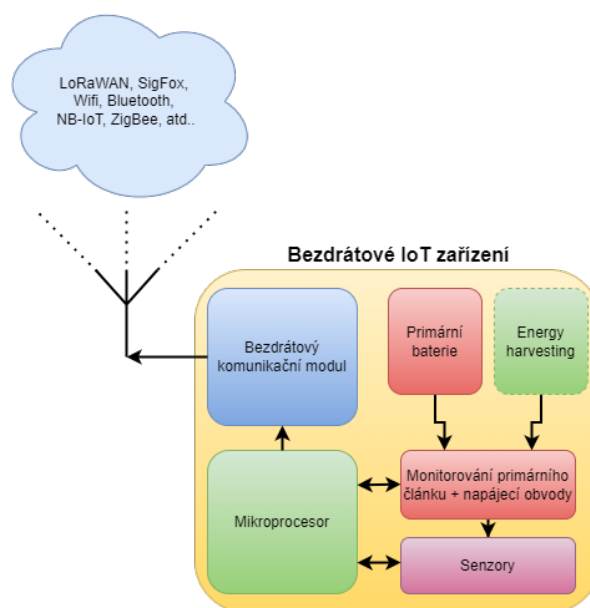
Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na možnosti monitorování kapacity primárních článků (nenabíjecích baterií) využitelných pro nízkopříkonová bezdrátová IoT zařízení. Samotné monitorování kapacity je velice důležitou a ve své podstatě i nedílnou součástí všech dnešních „bezdrátových“ zařízení nejen v IoT. Umožňuje uživateli nebo provozovateli poskytovat informace o současném stavu zařízení, resp. o stavu zbývající energie v baterii.

Stěžejními tématy této práce jsou výběr a rešerše vhodných integrovaných obvodů souvisejících s touto problematikou monitorování zbývající energie v primárních bateriích a částečnou predikcí této energie, včetně popisu využívaných metod a algoritmů. Práce se snaží částečně přiblížit a popsat problematiku IoT sítí, včetně technologií používaných k jejich realizaci. Následně se práce pro lepší uvedení do dané problematiky zabývá popisem nejpoužívanějších bezdrátových komunikačních protokolů, tak i drátových sběrnic, z nichž jedna z nich je následně využita v praktické části této diplomové práce. Jako příklad bezdrátového IoT zařízení je zde uveden KETCube, který je popsán z hardwarové i softwarové stránky. Tato prototypová platforma je poté využita i k měření a ověření vybraných integrovaných obvodů. Dále je zde rozebráno téma *Energy harvesting*, který je zde uveden především jako jedna ze zajímavých oblastí této problematiky. Následné kapitoly se již zabývají chemickým složením a konstrukcí primárních článků, a poté i podrobným rozborem měřících a predikčních metod včetně algoritmů. Teoretickou část práce završují rešerše vybraných integrovaných obvodů a primárních baterií.

Praktická část této diplomové práce je věnována nejprve návrhu elektrických schémat pro vybrané integrované obvody včetně následné realizace výroby příslušných desek plošných spojů. Pozornost je dále zaměřena na příslušnou softwarovou obsluhu vybraných integrovaných obvodů, přičemž je zde nastíněn i výpočet jednotlivých parametrů. Následuje návrh odpovídajícího validačního měřícího systému pro ověření správnosti měřených hodnot pomocí integrovaných obvodů. Tento návrh je doplněn o datalogovací software včetně vizualizačního programu. Na závěr jsou zde uvedeny veškeré naměřené hodnoty včetně jejich vizualizace a porovnání s teoretickými hodnotami.

## 2 Koncept

Obecně se IoT zařízení skládá z několika základních bloků, kde každý z nich má konkrétní a nepostradatelnou funkci pro celkovou funkcionalitu zařízení. Základní nastínění přibližného blokového uspořádání bezdrátového IoT zařízení je znázorněno na Obr. 2.1 níže. Základním a nejdůležitějším blokem je zdroj elektrické energie. U bezdrátových zařízeních je tímto zdrojem především baterie, která může být buď v podobě sekundárního (nabíjecího) článku, nebo primárního (nedobíjecího) článku. Možným blokem v oblasti napájení může být tzv. *Energy harvesting*, tedy nabíjení instalovaného akumulátoru či prodloužení životnosti primárního článku pomocí získávání a přeměny energie z okolí zařízení. Další důležitou součástí tvoří integrované obvody, které podávají informace o stavu a zbývající energii v článku (baterii), případně monitorují spotřebu zařízení, tedy toku energie z baterie do ostatních částí zařízení, kdy případně mohou měnit napěťové úrovně či stabilizovat napájecí napětí. Právě tato část je předmětem diplomové práce.



Obr. 2.1: Koncept IoT zařízení s primární baterií.

Samostatný blok tvoří také sensorová část závisící na povaze a účelu zařízení. Sensory pro tyto aplikace by měly být vybírány s ohledem na spotřebu energie, miniaturizaci, přesnost a adekvátnost měřících vlastností.

Nedílnou součástí zařízení je poté mikroprocesor. Ten zpracovává veškerá data ze

senzorů a měřících obvodů, a poté připravuje balík dat pro další blok, který zprostředkovává bezdrátovou komunikaci. V této části zařízení se uplatňuje nejen hardwarová spotřeba energie, ale také efektivnost implementovaného softwaru, resp. firmwaru zařízení a jeho schopnosti hospodařit s energií.

Poslední blok představuje bezdrátový modul, který předává zpracovaná data dále po řetězci bezdrátové komunikace. V této části může být využito nepřeberného množství bezdrátových komunikačních standardů (LoRa, Sigfox, NB-IoT, atd.).

### 3 Internet of Things - IoT

Internet věcí, zkráceně IoT, je v dnešní době jednou z nejrozšířenějších technologií a součástí všedního života každého z nás. Můžeme se s ní setkat prakticky u všech moderních a denně používaných zařízení. V nejšířím slova smyslu pojem IoT označuje systém vzájemně propojených objektů a zahrnuje tedy vše, co je připojeno k Internetu. Jde především o vzájemně propojená počítačová zařízení, digitální stroje a přístroje, konzumní elektroniku, automobily či „smart“ pomůcky a doplňky pro zvířata a lidi, které mají jedinečné identifikátory (UID). IoT zařízení jsou schopna sbírat a přenášet data přes širokou škálu různých bezdrátových sítí, a to bez lidského zásahu do komunikačního řetězce. Zařízení mohou komunikovat buď vzájemně mezi sebou a nebo přímo s cloudem (internetem). Díky této skutečnosti je následně možné sdílení a bezproblémová výměna dat, komunikace mezi senzory, zpracovávající elektronikou a cloudem či serverem a následnou vizualizací pro uživatele. Díky sběru velkého množství dat je pak možné následně lépe predikovat a reagovat na různé podněty, či využít strojového učení samotného zařízení k jeho zefektivnění [1, 2]. Ovšem i IoT zařízení s sebou nesou několik rizik, a to především nebezpečí odcizení dat či neautorizovaného přístupu do zařízení [3].

V tomto hyperpropojeném světě mohou digitální systémy zaznamenávat, monitorovat a upravovat každou interakci mezi propojenými předměty nebo zařízeními. Nastává zde tak propojení fyzického a digitálního světa, ve kterém obě složky spolupracují a dokáží tak vysoce zefektivnit veškeré činnosti [1, 2].



Obr. 3.1: Koncept IoT (překresleno z [4]).

## 3.1 Zařízení

V dnešní době existuje pro IoT nepřehledné množství různých zařízení (angl. *Things*), kde každé z nich má vlastní a jednoznačný identifikátor (UID). Obecně lze říci, že za IoT zařízení můžeme považovat cokoli, co je připojeno do Internetu a dokáže uživateli poskytovat naměřená data [5].

Obecně se tedy jedná o elektronické zařízení, které obsahuje různé druhy senzorů a může přenášet naměřená telemetrická data z jednoho objektu do druhého. Mezi zařízení IoT patří například bezdrátové senzory (včetně obsaženého softwaru), akční členy atd. [6]. Zařízení internetu věcí stále častěji využívají umělou inteligenci a strojové učení, aby vnesla inteligenci a autonomii do systémů a procesů, jako je například autonomní řízení, průmyslová chytrá výroba, lékařské vybavení a domácí automatizace. Mnoho z těchto zařízení jsou malé, výkonově a nákladově omezené systémy založené na mikrokontrolérech [7].

## 3.2 Brány

Brány (angl. *Gateways*) v IoT síti tvoří pomyslný most mezi rozličnými komunikačními technologiemi/zařízeními. Figurují zde jako médium pro spojení mezi zařízeními samotnými nebo zajištěním komunikace mezi zařízením/senzory a vnějším světem, kterým je myšlený cloud (server) potažmo celý Internet. Brána představuje obvykle hardwarové zařízení obsahující aplikační software [8]. Provádí také mnoho dalších úkolů, jako je překlad protokolů, agregaci všech přenášených dat, místní zpracování a filtrování dat před jejich odesláním do cloudu, kde proběhne jejich uložení. Dokáže i autonomně ovládat podružná zařízení na základě vložených dat a instrukcí od uživatele. Jedním z důležitých prvků u IoT brány je zabezpečení celé sítě před neautorizovaným přístupem [9].

## 3.3 Komunikace

Většina zařízení v IoT síti potřebuje komunikovat nebo alespoň občasně navázat komunikaci a odeslat telemetrická data. Některá zařízení mohou data pouze odesílat, jiná zase přijímat a poté i odesílat. Zatímco komunikace mezi IoT zařízeními je ve vět-

šině případů přímá, naopak komunikace na větší vzdálenost bude probíhat především pomocí brány, která zde zprostředkovává komunikační most mezi zařízením a cílem (serverem/cloudem). Komunikaci v síti IoT dělíme na několik druhů. Prvním druhem je komunikace mezi IoT zařízeními samotnými (D2D angl. *Device to Device*), kdy je zapotřebí alespoň dvou IoT zařízení, komunikujících spolu bez jakéhokoliv aplikačního serveru pomocí bezdrátové komunikace. Další druh představuje komunikace mezi IoT zařízením a aplikací (D2A angl. *Device to Application*). Touto komunikací je myšleno zabezpečené zaslání dat z IoT zařízení přímo uživateli, např. v podobě zpráv. Třetím druhem komunikace je od IoT zařízení k bráně (D2G angl. *Device to Gateway*), kdy se jedná opět o zabezpečenou bezdrátovou komunikaci během níž je využito brány jako komunikačního uzlu a prostředníka pro bezdrátovou komunikaci. Posledním druhem je komunikace IoT zařízení s cloudem (D2C angl. *Device to Cloud*). Tato komunikace představuje směrové propojení mezi IoT zařízením a poskytovatelem cloudové služby, kde probíhá opět přenos informací od IoT zařízení ke koncovému uživateli a uchování telemetrických dat pro analytické zpracování. V případě sítě IoT jsou všechny tyto druhy využívány simultánně a paralelně, kdy je používáno i nespočtu bezdrátových, ale i drátových komunikačních technologií mezi těmito body. Probíhá zde celý řetězec komunikace od samotného IoT zařízení až po koncového uživatele [10].

### 3.4 Industrial Internet of Things - IIoT

Internet průmyslových věcí, zkráceně IIoT, je určitou podmnožinou základního IoT, se kterým sdílí základní rysy. Architektura IIoT se ale oproti standardnímu IoT vyznačuje vyšší úrovní bezpečnosti, zabezpečením, spolehlivostí komunikace bez narušení průmyslových operací v reálném čase. Dalšími výhodami jsou vyšší možnosti škálovatelnosti, rozšiřitelnosti, modularity a interoperabilitu mezi heterogenními zařízeními využívajícími různé technologie. Zaměřením IIoT je efektivní správa průmyslových aktivit a operací s možností predikce údržby. Primárním polem působnosti IIoT je tedy především průmyslový sektor a orientace na stroje samotné. Je zde dbáno především na spolehlivost těchto zařízení, přenosy velkých objemů dat a zabezpečení. Samotné IIoT je jistou nadstavbou a podpurným prvkem pro Průmysl 4.0 potažmo budoucí Průmysl 5.0. [11].



### 3.5 Internet of Medical Things - IoMT

IoMT neboli Internet lékařských věcí, někdy také označováno jako IoT ve zdravotnictví, je jedním z dalších podmnožin klasického IoT. Jedná se tedy především o síť zdravotnických zařízení připojených k internetu věcí, dále pak hardwarové infrastruktury a softwarové aplikace, které jsou využívány k propojení se zdravotnickými informačními systémy. IoMT umožňuje bezdrátovou, vzdálenou a zabezpečenou komunikaci přes Internet poskytující rychlou a flexibilní analýzu lékařských dat ze zařízení u pacienta. IoMT se vyznačují extrémně nízkou spotřebou a „lehkými“ komunikačními protokoly s malou režii datového přenosu [12, 13].

Přínosem IoMT je využití vlastností IoT zařízení, tedy miniaturního bezdrátového zařízení, jako určité náhrady poměrně velkých neflexibilních monitorovacích systémů. Tato přenosná monitorovací jednotka se skládá hlavně ze senzorů a elektronických obvodů, které jsou schopny poskytovat životně důležitá data o zdravotním stavu pacienta, jako je například srdeční frekvence, pravidelnost dýchání, krevní tlak, tělesnou teplotu, svalovou aktivitu či hladinu glukózy v krvi. Díky těmto vlastnostem tak může být pacient monitorován na dálku a lékař poté může z naměřených dat lépe diagnostikovat problém či sledovat pacientův aktuální stav [12, 13].

# 4 Bezdrátové komunikační technologie v IoT

Komunikační technologie můžeme rozdělit na dvě velké skupiny s ohledem na používané přenosové médium na „drátové“ a „bezdrátové“. U první skupiny je médiem fyzická cesta, jako jsou koaxiální kabely, kroucené dvoulinky, optická vlákna atd., které vedou tento signál fyzicky od jednoho bodu k druhému. Oproti tomu u druhé skupiny nepotřebuje bezdrátová komunikace takovéto fyzické médium, ale šíří se čistě prostorem, tedy prostředím kolem nás [14].

Pokud se podíváme do historie, první bezdrátovou technologií byly kouřové signály. Blíže naší současné industriální době se pojem bezdrátová komunikace vyskytl ve spojení se jménem Guglielmo Marconi a jeho telegrafu. Základem všech dnešních moderních bezdrátových technologií je princip šíření elektromagnetických vln v prostředí, jako je atmosféra. Zdroj takovýchto vln představuje vysílač převádějící elektrické impulsy na rádiové signály ve formě elektromagnetických vln, které následně přes anténu vyšle do okolního prostředí. Veškerý přenos signálu, tedy dat, se provádí pomocí antén. Ty jsou poté připojeny k příslušné vyhodnocovací - vysílací (TX), přijímací (RX) či obousměrné (RX/TX) elektronice, která signál buď namoduluje a připraví data k odeslání přes anténu, a nebo naopak signál pomocí antény přijme, demoduluje a rozkóduje zpět na elektrické signály a připraví je pro další zpracování v řetězci [14, 15].

Jedním z největších rozmachů bezdrátových systémů a technologií, tak jak je v dnešní době známe, byl s příchodem mobilních telefonů, tedy celulárních sítí, které zapříčinili exponenciální růst bezdrátové komunikace a i v současnosti jsou jedním z hlavních a nepostradatelných zástupců a společníků všedního života. Většina mobilních telefonů komunikuje v síti GSM či GPRS, které jsou dnes doplněny starší sítí 3G a novějšími 4G a 5G. Dalším velkým odvětvím bezdrátových technologií, se kterými se setkáváme dnes a denně, je pozemní rádiové (FM od 88 do 108 MHz) a televizní vysílání, dnes již standard DVB-T2 (na frekvenci od 470 do 694 MHz), které je doplněno i vysíláním satelitním. Dalšími odvětvími mohou být poziční a navigační komunikační systémy pro automobilovou a lodní dopravu, kde se můžeme setkat s pojmy jako je GPS (provozováno na frekvenčních pásmech: **L1**: 1575,42 MHz, **L2**: 1227,6 MHz, **L3**: 1176,45

MHz [16]), GLONASS (provozován na frekvenčních pásmech: **G1**: od 1589,0625 MHz do 1605,375 MHz, **G2**: od 1272,9375 MHz do 1248,625 MHz a **G3**: 1201 MHz [17]), BEIDOU (provozováno na frekvenčních pásmech: **B1C**: 1575,42 MHz, **B2a**: 1176,45 MHz a **B3I** 1268,52 MHz [18]) či GALILEO (na frekvenčních pásmech: **E1**: 1559 až 1591 MHz, **E6**: 1260 až 1300 MHz, **E5**: od 1164 do 1214 MHz [19]). V letecké dopravě je pak možné nalézt poziční radary. V moderních domácnostech se dále můžeme setkat dnes s již běžnými komunikačními technologiemi, jako je Wifi (ve frekvenčním pásmu od 2401 Mhz až do 2495 MHz nebo 5150 MHz až 5990 MHz) či Bluetooth (frekvenční pásmo zejména 2,4 GHz). Velkou expanzi v současné době zažívají také bezdrátové technologie v oblasti Internetu věcí (IoT) a jeho podmnožin, IIoT a IoMT. V tomto odvětví existuje velké množství bezdrátových komunikačních standardů, které pokrývají celou škálu frekvencí, funkcí, energetické náročnosti, dosahu atd. Mezi jedny z nejznámější, které je potřeba zmínit, patří např.: LoRa, Sigfox a NB-IoT, tedy sítě a protokoly pracující ve volném ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) frekvenčním pásmu (v rozsahu 433,05 až 434,79 MHz a 886 až 906 MHz) [15, 20].

V dnešním industriálně laděném, moderním *smart* světě se setkáváme dnes a denně s nepřehledným množstvím bezdrátových technologií, které nám z velké části zpřijemňují život. Je ale nutné poznamenat, že se jedná o stálý vývoj, a tedy každým dnem nalézáme čím dál více možností a funkcí, které je stále potřeba inovovat a zdokonalovat, aby takové sítě mohly vůbec existovat. Jedním z neblahých účinků takto rozsáhlých bezdrátových komunikačních sítí nemusí být jen technologické problémy, ale i různé neblahé účinky na lidské zdraví, které jsou ale předmětem rozsáhlých vědeckých sporů a výzkumných prací.

## 4.1 LoRa<sup>TM</sup>

Long-Range je patentovaná technologie modulace vyvinuta francouzskou společností Cycleo, dnes již ale vlastněna firmou Semtech<sup>1</sup>, která dnes stojí za touto významnou komunikační technologií, používanou především v síti IoT. Samotná LoRa je ve své podstatě fyzická vrstva, která poskytuje komunikační spojení. Ke komunikaci využívá schéma tzv. CSS (*Chirp Spread Spectrum*) neboli rozprostřeného spektra, které je odvozeno od DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Díky tomuto spektru je LoRa schopna komunikovat na vzdálenosti v řádu jednotek až desítek kilometrů a dosahovat velice dobré odolnosti proti rušení, interferencím a Dopplerovským jevům. V případě potřeby nízkoenergetické náročnosti bezdrátové komunikace je na místě využít spíše modulaci FSK (*Frequency Shift Keying*), která je podporována také. Její nevýhodou je ale nižší vysílací dosah [21, 22].

Díky rozšířenosti LoRa technologie a využití nelicencovaných sub-GHz ISM pásem, která jsou geograficky rozdělena na různé frekvenční oblasti a nesou značení podle místa využití a používané frekvence: US902-928, EU863-870, EU433, AS920-923 [23]. V ČR je využívána oblast EU863-870, přesněji frekvence 868 MHz a také oblast EU433 na nižší frekvenci 433 MHz. Více je možné nalézt na stránkách Českého telekomunikačního úřadu [24].

Jak již bylo řečeno, LoRa představuje pouze fyzickou vrstvu (viz ISO/OSI model<sup>2</sup>), takže již nezasahuje do vyšších vrstev protokolu. To obstarává podvrstva MAC (*Medium access control* - řízení přístupu k médiím, podle IEEE 802) nacházející se v linkové vrstvě (*Data link layer*), tedy LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*). Ta definuje architekturu sítě a komunikační protokol. Specifikace LoRaWAN je standardizována a přístupná jako *open source* spravována LoRa aliancí<sup>3</sup>. Samotná síť je poté založena na hvězdicové topologii, která zajišťuje, oproti *mesh* síti nižší spotřebu energie. Dále je definována maximální velikost paketu na 243 bajtů a vysílací výkon je omezen na 25 mW viz ČTU [24]. Více parametrů lze nalézt v Tab. 4.1 či v literatuře [21, 22, 25]. Dalším parametrem, který ovlivňuje kvalitu přenosu je SF (*Spreading Factor*) faktor, ten kontroluje rychlost „cvrlikání“. Čím nižší je SF, tím je rychlejší přenos dat, ale naopak je nižší dosah. S tímto parametrem souvisí i šířka pásma: čím vyšší

<sup>1</sup>Společnost Semtech: <https://www.semtech.com/>

<sup>2</sup><https://www.itu.int/rec/T-REC-X.200-199407-1/en>

<sup>3</sup><https://loro-alliance.org/>

šířku pásma zvolíme, tím dosáhneme rychlejšího přenosu a naopak. S ohledem na tyto parametry je odvozen vysílací čas, který si můžeme spočítat viz [26]. Dále LoRaWAN definuje několik komunikačních tříd pro řešení různých latencí v IoT:

- **Třída A** (Obousměrná koncová zařízení)  
Komunikaci ve třídě A zahajuje vždy koncové zařízení. Zařízení může kdykoli odeslat uplinkovou zprávu [25].
- **Třída B** (Obousměrná koncová zařízení s plánovanými přijímacími okny)  
Kromě přijímacích (downlink) oken iniciovaných třídou A otevírá zařízení třídy B plánovaná přijímací okna pro příjem zpráv ze síťového serveru, pomocí časově synchronizovaných značek vysílaných bránou zařízení [25].
- **Třída C** (Obousměrná koncová zařízení s maximálními přijímacími okny)  
Rozšiřuje třídu A tím, že po přijetí zprávy z brány nechávají otevřená (téměř nepřetržitě) přijímací okna [25].

V současné době se na trhu vyskytuje nepřehledné množství samotných čipů, ať už z portfolia společnosti Semtech, mezi které patří rodina integrovaných obvodů SX12xx, SX13xx, atd. [27] nebo od jiných výrobců. Samozřejmě se ve většině případů setkáme právě se zmíněnými obvody.

## 4.2 Sigfox

Sigfox je jedna z další bezdrátových technologií využitelných v IoT, kterou vyvinula stejnojmenná společnost. Využívá vlastní patentovanou technologii modulace *Ultra Narrow Band* s diferenciálním binárním klíčováním fázovým posunem (*Binary-Phase Shift Keying*), což je digitální modulace založená na posunutí fáze harmonické nosné. Komunikuje v nelicencovaných sub-GHz ISM pásmech, např. 868 MHz v Evropě, 915 MHz v Severní Americe a 433 MHz v Asii. Pro více informací je opět vše regulováno Českým telekomunikačním úřadem [24]. Veškerá tato pásma se překrývají s ostatní IoT technologií např. s technologií LoRa. Využitím ultra úzkého pásma (100 Hz) v sub-GHz spektru Sigfox efektivně využívá frekvenční pásmo a má velmi nízkou hladinu šumu, což vede k velmi nízké spotřebě energie, vysoké citlivosti přijímače a levnému návrhu antény [25].

Počet zpráv přes uplink je omezen na 140 zpráv za den. Maximální délka užitečného zatížení pro každou uplinkovou zprávu je 12 bajtů. Počet zpráv přes downlink je omezen na 4 zprávy za den. Maximální délka užitečného zatížení pro každou downlink zprávu je 8 bajtů. Bez potvrzovací schopnosti každé uplinkové zprávy se pro zajištění přenosové spolehlivosti používá časová/frekvenční diverzita a přenosová duplikace, kdy každé koncové zařízení odešle zprávu třikrát prostřednictvím různých frekvenčních kanálů. Přijímací (základní) stanice mohou přijmout zprávy současně skrz všechny kanály. Koncové zařízení tak může přenášet zprávu na náhodně zvoleném kanálu, což snižuje složitost koncového zařízení a snižuje jeho cenu [25].

Hlavní výhodou sítě je, že uživatel nepotřebuje žádnou podpůrnou infrastrukturu, pouze si koupí vysílač a svoje zařízení zaregistruje. Dále si pomocí API, kterou např. poskytne provozovatel sítě, stahuje zpracovaná data do svých podpůrných systémů, kde s daty nakládá podle své libovůle. Je třeba však dodat, že osud této sítě je nejistý, jelikož mateřská společnost požádala ve Francii o ochranu před věřiteli [28].

### 4.3 NB-IoT

Jedná se o další bezdrátovou úzkopásmovou technologii, která může koexistovat v licenčních frekvenčních pásmech LTE nebo GSM, se šířkou pásma 200 kHz, a jak její název napovídá, je předurčena k využití především v IoT. Lze říci, že se tedy jedná o mobilní rádiovou síť standardizovanou stejným způsobem jako LTE. Její komunikační protokol je založený na tomto protokolu (LTE) a to tak, že NB-IoT využívá fyzické a vyšší vrstvy ISO/OSI modelu této sítě. Ve skutečnosti je NB-IoT vyvinuto s minimálními funkcemi protokolu LTE a podle potřeby je vylepšuje pro aplikace IoT. Provozovateli této sítě v ČR jsou operátoři mobilních (celulárních) sítí, a to zejména O2, Vodafone a T-Mobile. NB-IoT je optimalizována pro malé a málo časté datové zprávy a nedisponuje funkcemi, které nejsou pro účely IoT vyžadovány. Umožňuje konektivitu více než 100 000 zařízení na buňku, ovšem tuto konektivitu je možné zvýšit a to připojením k více operátorům najednou [25, 29].

Je zde využívána modulace Kvadraturního klíčování fázovým posuvem QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) s FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) v uplinku a ortogonální FDMA (OFDMA) v downlinku. Díky využití modulaci a celulární síti

mobilních operátorů je zajištěno celoplošné pokrytí i uvnitř budov a v podzemních prostorech, kde není přístupná ani 2G GSM síť. NB-IoT je celosvětově standardizovanou sítí včetně roamingu<sup>4</sup>. Maximální rychlost downlinku je 200 kb/s a 20 kb/s při uplinku s maximální možnou velikostí zprávy 1600 bajtů. Pokud ovšem přihlídneme na energetickou úsporu, tak při odeslání 200 bajtů denně může dosáhnout životnosti baterie přibližně 10 let [25, 30]. Zlepšení NB-IoT pokračuje s 15 vydáním 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*), tedy dohoda o spolupráci v oblasti mobilních komunikací. Podle aktuálního plánu 3GPP se NB-IoT rozšíří tak, aby zahrnoval služby multicastu, tedy např. aktualizace softwaru koncových zařízení a zprávy týkající se celé skupiny koncových zařízení, mobilitu a další technické detaily pro rozšíření oblasti aplikací. Dalším benefitem sítě jsou její technologické klady s ohledem na stabilitu, dosah a zabezpečení proti komunikačním výpadkům [25, 31].

## 4.4 Porovnání LoRa, Sigfox, NB-IoT

Při výběru vhodné technologie LPWAN pro aplikace IoT je potřeba vzít v úvahu různé faktory a vlastnosti použitelných technologií. Mezi tyto faktory můžeme zařadit škálovatelnost, dosah sítě, pokrytí, jednoduchost nasazení, cenovou dostupnost, životnost zařízení (baterie), QoS, velikost zprávy, latenci, atd. Podrobnější souhrnné porovnání různých parametrů je vidět v Tab. 4.1 a vizuálně zobrazené vybrané parametry lze nalézt na Obr. 4.1 [29].

Tab. 4.1: Porovnání sítí LoRa, Sigfox, NB-IoT [25, 30].

	Sigfox	LoRa	NB-IoT
Modulace	BPSK	CSS	QPSK
Frekvence	Bezlicenční ISM pásma EU-868 MHz, US-915 MHz, AS-433 MHz	Bezlicenční ISM pásma EU-868 MHz, US-915 MHz, AS-433 MHz	Licencovaná LTE frekvenční pásma
Šířka pásma	100 Hz	250 kHz a 125 kHz	200 kHz
Rychlost downlink	0,1 kbps	0,3 - 50 kbps	0,5 - 200 kbps
Rychlost uplink	0,1 kbps	0,3 - 50 kbps	0,2 - 180 kbps
Výstupní výkon	25 mW (14 dBm) - max	25 mW (14 dBm) - max	200 mW (23 dBm), může i více
Oboustranná komunikace	Limitováno/Half-duplex	Ano/Half-duplex	Ano/Half-duplex
Počet zpráv/den	140 (UL), 4 (DL)	Bez limitu	Bez limitu
Délka paketu (max)	12 bajtů (UL), 8 bajtů (DL)	243 bajtů	1600 bajtů
Dosah	10 km v zástavbě, 40 km ve volném prostředí	5 km v zástavbě, 20 km ve volném prostředí	1 km v zástavbě, 10 km ve volném prostředí
Imunita vůči rušení	Velmi vysoká	Velmi vysoká	Nízká
Ověřování/šifrování	Nepodporuje	Ano - AES128	Ano - LTE šifrování
Lokalizace	Ano - RSSI	Ano - TDOA	Ne
Možnost privátní sítě	Ne	Ano	Ne
Topologie	Hvězda ( <i>Star</i> )	Hvězda ( <i>Star</i> )	Hvězda ( <i>Star</i> )
Životnost baterie	> 10 let	> 10 let	10 let
Spotřeba energie	Malá	Malá	Velmi malá
Standardizace	Spolupráce společností Sigfox a ETSI (standardizace)	LoRa Alliance	3GPP

<sup>4</sup>Roaming je poskytování služeb účastníkovi v jiné síti, než kde má účastník zaregistrované svoje telekomunikační služby.

- **QoS** (*Quality of Service*)

Sigfox a LoRaWAN využívají bezlicenční sub-GHz pásma a asynchronní komunikaci, díky které mohou efektivně fungovat a potlačovat rušení. Také jsou odolné proti *fading* („blednutí“) signálu. Bohužel ale neposkytují QoS - kvalitu služeb. Oproti tomu NB-IoT využívá pro komunikaci licencované spektrum a synchronní protokol založený na LTE. Ten je optimální pro QoS na úkor nákladů spojených s cenou frekvenčního pásma (aukce frekvenčních pásem LTE se pohybuje cca 500 mil.€ za MHz). Z tohoto důvodu je NB-IoT preferováno pro aplikace, u kterých je potřeba zajistit kvalitu služeb. U aplikací, které to nevyžadují, je na místě využít jednu ze sítí LoRaWAN či Sigfox [25].

- **Výdrž baterie a zpoždění**

Ve všech třech zmíněných sítích jsou po většinu času zařízení ve spánku, což velice snižuje jejich vlastní spotřebu. Při porovnání koncového zařízení se sítí NB-IoT je spotřeba nejvyšší z důvodu synchronní komunikace a QoS. Je to zapříčiněno i použitou modulací OFDM /FDMA, která vyžaduje vyšší špičkový proud. Oproti tomu koncová zařízení s technologií LoRa či Sigfox mají nižší spotřebu energie, a tedy delší čas nasazení a výdrže [25].

NB-IoT poskytuje nejnižší časové zpoždění (latenci) připojení oproti ostatním. LoRaWAN poskytuje částečnou nápravu vyšší časové prodlevy ve třídě C, což ale způsobí vyšší spotřebu energie. Pokud není na místě řešení časového zpoždění komunikace, poté se uplatní síť Sigfox nebo LoRaWAN ve třídě A [25].

- **Rozšiřitelnost sítě a délka zprávy**

Podpora velkého množství koncových zařízení a rozšiřitelnost (škálovatelnost) v síti IoT je klíčovou vlastností. Nejvyšší škálovatelnost nabízí technologie NB-IoT, která umožňuje konektivitu až 100 tis. zařízení na jednu stanic. Naproti tomu LoRaWAN a Sigfox dovolují „pouze“ přibližně 50 tis. zařízení [25].

NB-IoT dále nabízí i nejvyšší možnou délku zprávy (paketu) ve velikosti až 1600 bajtů. LoRaWAN pak umožňuje odeslání 243 bajtů a Sigfox disponuje nejnižší délkou zprávy o velikosti „pouhých“ 12 bajtů, což může být v některých aplikacích velmi limitující [25].



- **Pokrytí a dosah**

Sítě IoT jsou doménou zejména měst a městské zástavby či průmyslových komplexů. V ideálním případě pro pokrytí celého města postačuje u Sigfox technologie jedna základnová stanice (tj. dosah  $>40$  km). Jako příklad lze uvést pokrytí Belgie (rozloha cca 45 tis. km<sup>2</sup>), kde se nachází pouze 7 základnových stanic Sigfox. Naopak síť LoRaWAN nedisponuje tak velkým dosahem (tj.  $>20$  km), stále ale umožňuje pokrytí celého města (např. Barcelony) pouze třemi základnovými stanicemi (bránami) [25, 30].

NB-IoT má oproti předchozím dvěma sítím nejnižší schopnost pokrytí (tj. dosah  $<10$  km) a její použití je možné pouze tam, kde je dostupná i technologie LTE (venkovské oblasti). Tento nedostatek je však vyvážen především možností komunikace se zařízeními, která jsou tzv. *indoor* či *deep indoor*, tedy mimo dosah ostatních sítí z důvodu neprostupnosti signálu [25].

- **Model nasazení**

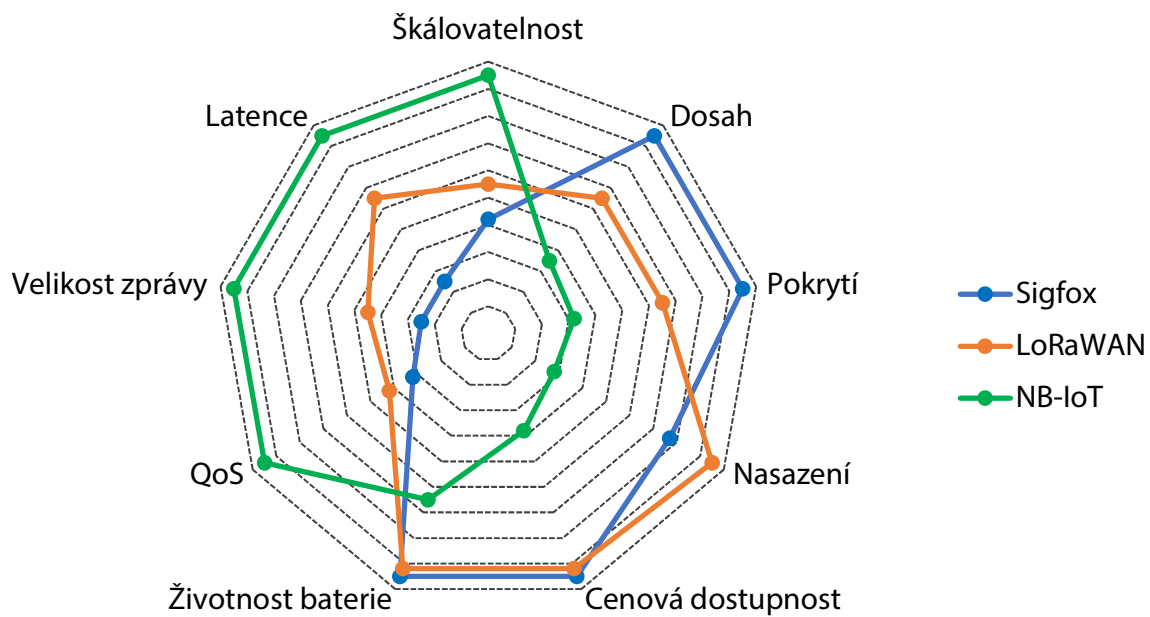
Standardizace NB-IoT za účelem vytvoření celosvětové sítě započala v roce 2016. Naopak síť LoRaWAN a Sigfox jsou technologicky vyspělé a v různých zemích a městech komercializovány. LoRaWAN je v současné době nasazen ve 42 zemích a Sigfox celkově ve 31 zemích. Bohužel technologie Sigfox se aktuálně potýká s finančními problémy, a je tak nutná jistá obezřetnost při jejím nasazování.

Na rozdíl od Sigfoxu a NB-IoT nabízí LoRaWAN nasazení v ostrovním režimu, tedy lokální sítě, a také provoz veřejné sítě prostřednictvím základnových stanic. Tyto vlastnosti jsou její nespornou výhodou při výběru specifické IoT i IIoT bezdrátové technologie [25].

- **Cena**

Jedním z nejvíce rozhodujících parametrů bude pro koncové uživatele cena pořízení. V tomto ohledu se nejvíce vyplatí využití sítí LoRaWAN a Sigfox, u kterých se cena koncového zařízení pohybuje v rozmezí 2 až 5 €. U LoRaWAN pak cena brány činí přibližně 100 € a základnové stanice 1000 €. Naproti tomu u Sigfoxu může cena základnové stanice být až 4000 €. Nejvíce nákladná vychází technologie NB-IoT u které se pohybuje cena koncového zařízení okolo 20 € a základnové

stanice až 15000 €. Dále je nutné zvážit i spektrum frekvencí, na kterých je daná technologie provozována [25].



Obr. 4.1: Grafické porovnání vybraných parametrů IoT sítí (překresleno z [29]).

## 5 Drátové komunikační sběrnice

Sběrnicí můžeme obecně nazvat libovolný soubor vodičů používaných především k přenosu dat. V případě elektroniky se jedná o určitý subsystém, který se využívá k propojení elektronických komponentů, ať už uvnitř procesoru, nebo mezi externími periferiemi, po kterých posléze mohou komunikovat a být i napájeny. V dnešní době existuje nepřehledné množství sběrnic fungující na různých principech, využívající mnoho komunikačních protokolů a počtu datových vodičů. Sběrnice lze rozdělit podle jejich funkce na datové, adresové, signálové pro řízení přenosu a napájecí.

První skupinu tvoří datové vodiče, a jak jejich název napovídá, jedná se o vodiče přenášející hlavně data (datová slova). Vedou (nesou) informace z periferie do procesoru, např. informaci o naměřené teplotě či napětí ze senzorů a ADC převodníku nebo naopak konfigurační slovo od řídicího procesoru k periférii. Další skupinou jsou vodiče adresové. Jejich prioritní funkcí je adresace a „výběr“ zařízení, které má data posílat či přijímat. Třetí skupinu představují vodiče přenášející signály pro řízení provozu či hodinový signál. Poslední skupinu tvoří vodiče, které jsou součástí většiny sběrnic, ale nepřenášejí žádná data, pouze zprostředkovávají napájení periferií. Většinou může být využito buď spojení vůči společnému potenciálu (společná „zem“) nebo spojení bez společného potenciálu, které je využito u diferenciálního vedení. Veškerá kombinace těchto vodičů záleží ovšem na použité sběrnici a příslušném komunikačním protokolu, kdy většina sběrnic má vše již výrobcem stanovené a jejich podpora je obvykle součástí zařízení [32, 33].

Samotné sběrnice poté můžeme rozdělit podle způsobu komunikace na sériové a paralelní.

### 5.1 Paralelní komunikace

Paralelní komunikace využívá více linek (vodičů) k realizaci komunikace. Paralelní je nazývána proto, že zde mezi stranou odesílatele (TX) a příjemce (RX) neprobíhá posílání bitu za bitem, ale je vždy posláno celé bitové slovo (bajt) najednou. Oproti sériové komunikaci je určena tam, kde je potřeba vysokorychlostní přenos dat. Paralelní komunikace je zobrazena na Obr. 5.1. Přenos probíhá tedy najednou, paralelně, s

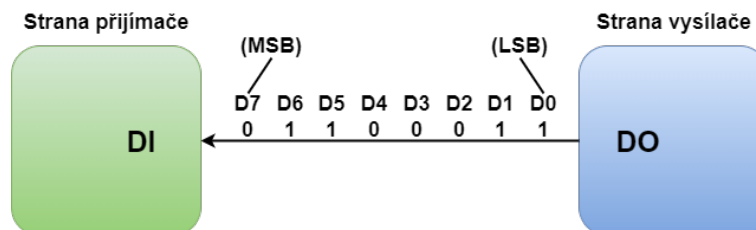
jedním hodinovým signálem. Nevýhoda této sběrnice spočívá především ve velkém počtu vodičů potřebných pro její realizaci, což se odrazí jak v její ceně, tak v potřebném realizačním prostoru. Mezi zástupce využívající paralelní komunikace můžeme zařadit PCI, SCSI, GBIP, ATA, atd. [34].



Obr. 5.1: Paralelní komunikace (překresleno z [34]).

## 5.2 Sériová komunikace

Sériovou komunikaci lze definovat jako odesílání jednoho bitu za druhým v přesném časovém sledu. Jedná se o nejjednodušší komunikaci mezi odesílatelem (TX) a příjemcem (RX). Vizualizace sériové komunikace je znázorněna na Obr. 5.2, kde je vidět posloupnost posílaných bitů. Sériová komunikace se s paralelní nemůže rovnat rychlostí přenosu dat, ale její nespornou výhodou je malý počet potřebných vodičů a prostor k její realizaci, což se odrazí i v její nízké ceně. Díky těmto přednostem došlo k jejímu rozmachu. Protokoly, které využívající sériovou komunikaci jsou I<sup>2</sup>C, SPI, USB, 1-Wire, CAN, RS-232 či RS485, atd. [35].



Obr. 5.2: Sériová komunikace s MSB první (překresleno z [35]).

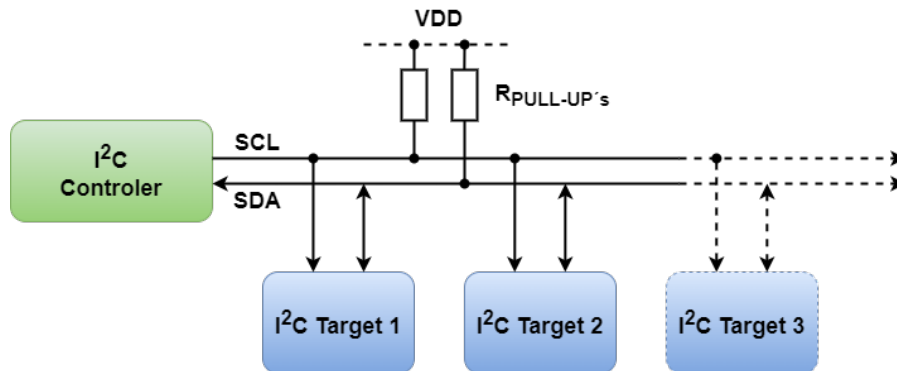
### 5.2.1 I<sup>2</sup>C

Sběrnice *Inter-Integrated Circuit* neboli I<sup>2</sup>C také I2C či IIC, byla vyvinuta společností Philips Semiconductors (dnes součástí NXP) v 80. letech minulého století jako dvou vodičové, synchronní a sériové rozhraní pro jednoduchou komunikaci dvou či více periférií v elektronických zařízeních. Dnes se již jedná o zavedený standard u většiny integrovaných obvodů. Pokud pomíneme napájecí vodiče pro periférie připojené ke sběrnici, můžeme potřebné vodiče minimalizovat pouze na dva, nazývané SCL (*Serial Clock Line*) a SDA (*Serial Data Line*). Po prvním zmíněném vodiči je přenášán hodinový signál a po druhém data.

Komunikační protokol je postavený na hierarchii *master/slave*, dnes již nazýváno *controller/target* nebo také *peripheral* viz [36]. Zařízení *controller* představuje ve většině případů řídicí mikroprocesor (MCU). Naproti tomu zařízení *target* je většinou v podobě různých periférií, jako jsou různé senzory, které si můžeme představit jako ADC a DAC, EEPROM paměti, různé řadiče a další podobné periférie s touto implementovanou sběrnici. Každé zařízení má svojí unikátní 7-bitovou nebo 10-bitovou adresu a LSB bit, kterým se určuje, zda do zařízení chceme zapisovat či z něj číst. Samotná periférie (*target*) nikdy samostatně nezahájí datový přenos bez vyzvání *controllerem*. Zařízení kompatibilní s touto sběrnici se připojují pomocí tzv. otevřeného kolektoru (*open collector*) nebo otevřeného drainu (*open drain*) a dojde k sepnutí komunikace do logické 0. Ovšem aby vše fungovalo správně a předešlo se neurčitému stavu, je nutné na této sběrnici použít tzv. *Pull-up* rezistory, jejichž úkolem je držet sběrnici v logické 1. Rezistory musí mít takovou hodnotu, aby bylo možné sběrnici ovládat, ale zároveň aby byly schopny držet jí v logické 1 [37]. Původní standardní rychlost I<sup>2</sup>C sběrnice byla 100 kbit/s. Dnes je nejpoužívanější rychlostí 400 kbit/s, někdy též uváděna jako *Fast mode - Fm*. Pokud to ovšem zařízení podporují, je možné využít i vyšší rychlosti označované jako *Fm+* s rychlostí 1 Mbit/s nebo *Hs* od 1,7 do 3,4 Mbit/s [36–38].

Je nutné poznamenat, že sběrnice má i několik omezení. Mezi hlavní, na které je třeba brát zřetel při její konstrukci, je kapacita vedení. Ta by v základním zapojení neměla přesáhnout 400 pF a délku fyzického spojení 1 m. Dalším potřebným prvkem při návrhu této sběrnice je vhodné zvolení *Pull-Up* rezistorů na vodiče SDA a SCL vůči napájecímu napětí společnému s MCU. Jedním z minoritních omezení může být i maximální počet připojitelných zařízení/periferií v počtu 128, kde každé musí mít vlastní

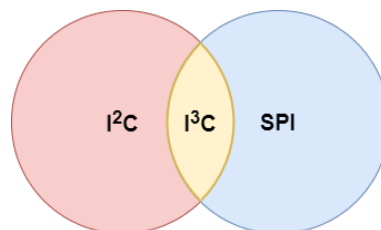
adresu, pro předcházení kolizím. Tento neduh lze ovšem vyřešit pomocí expanderu [36–38].



Obr. 5.3: Sběrnice I<sup>2</sup>C (překresleno z [37]).

### 5.2.2 I<sup>3</sup>C

Někdy též nazývána jako MIPI I<sup>3</sup>C nebo SenseWire. Jedná se o nový průmyslový standard pro sériové datové sběrnice. První informace o této sběrnici se objevily kolem roku 2016. Společnosti podílející se na vývoji této sběrnice jsou členy [Mobile Industri Processor Interface Alliance] (MIPI Alliance) nebo s ní na vývoji úzce spolupracují [39].



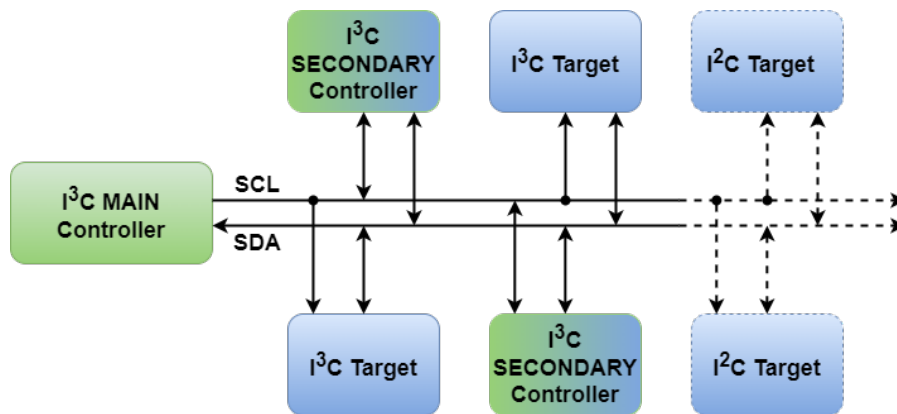
Obr. 5.4: Pozice I<sup>3</sup>C oproti ostatním sběrnicím (překresleno z [39]).

I<sup>3</sup>C sběrnice přidává značné množství funkcí systémového rozhraní, přičemž zachovává zpětnou kompatibilitu se starší sběrnicí I<sup>2</sup>C, oproti které ale zařízení na novější sběrnici podporují vyšší přenosové rychlosti, podobné rychlostem sběrnice SPI. Na tuto sběrnici je možné připojit jedno nebo více hlavních (*controller*), a jedno nebo více podřízených (*target*) zařízení. První, kdo na tuto sběrnici vytvořil a již i nabízí analyzátor, resp. analyzátor protokolu I<sup>2</sup>C a I<sup>3</sup>C, je společnost Prodigy Technovations<sup>1</sup>. Hlavní rozdíly mezi stávající I<sup>2</sup>C sběrnicí a novou spočívají v tom, že sběrnice I<sup>3</sup>C je

<sup>1</sup>Společnost Prodigy Technovations <https://prodigytechno.com/>

zamýšlena jako jediné rozhraní pro všechny digitálně připojitelné senzory používané v mobilních aplikacích. Tato sběrnice je také vhodná pro všechny střední a vysokorychlostní aplikace, včetně senzorů, výkonových ovladačů, akčních členů, MCU a FPGA. Standardní přenosová rychlost dat je až 12,5 Mb/s, tedy až 12 krát rychlejší než I<sup>2</sup>C, energicky úspornější a vhodnější pro mobilní a IoT aplikace. Režim HDR, kterým sběrnice disponuje, poskytuje srovnatelnou propustnost s SPI. Další zajímavou vlastností I<sup>3</sup>C je Dynamic Address Assignment (DAA), tudíž dynamické přiřazení adres. Zůstává zde ovšem i vlastnost statické adresy zařízení. Dalším zajímavou funkcí je podpora *multi-controller* provozu [39, 40], tedy přítomnosti více *controller* zařízení na společné sběrnici.

I<sup>3</sup>C obecně staví a vylepšuje funkce stávající sběrnice I<sup>2</sup>C při zachování zpětné kompatibility, a dokáže tak s nadsázkou nahradit všechny sběrnice a spojit je v jednu. Rozhraní je užitečné pro mnoho aplikací, jelikož poskytuje vysokorychlostní přenos dat při velmi nízkých úrovních výkonu a umožňuje *multi-drop* mezi hostitelským procesorem a periferními zařízeními. Sběrnice I<sup>3</sup>C je tedy možný a velice pravděpodobný nástupce předchozích zmíněných sběrnic, především tedy sběrnice I<sup>2</sup>C [40].



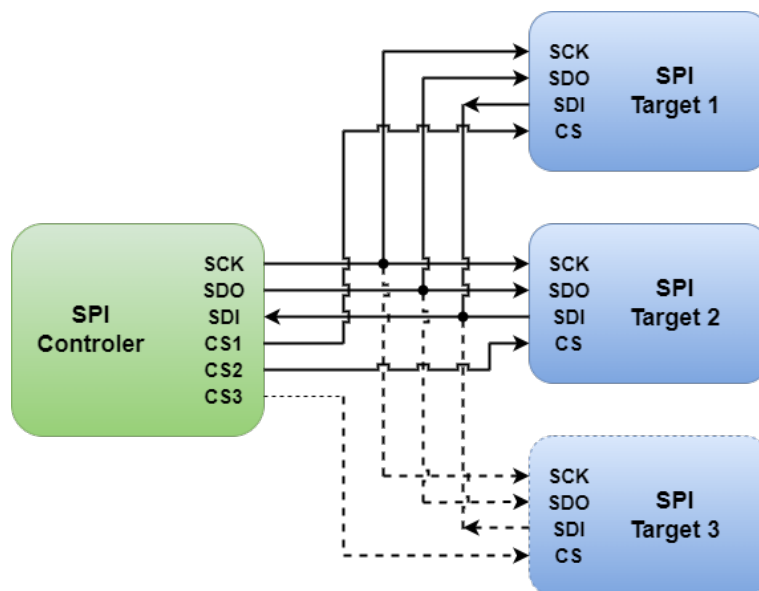
Obr. 5.5: Sběrnice I<sup>3</sup>C (překresleno z [41]).

### 5.2.3 SPI

Sériové periferní rozhraní (angl. *Serial peripheral interface*), zkráceně SPI je jedním z nejpoužívanějších rozhraní mezi mikrokontroléry a periferními integrovanými obvody, jako jsou různé senzory, ADC a DAC, posuvné registry, paměti typu SRAM a další periférie. SPI je synchronní a plně duplexní sběrnice, která díky svým vlastnostem dosahuje vysokých přenosových rychlostí. Není ovšem *multi controller* kompatibilní,

což znamená, že na sběrnici může být pouze jeden *controller*. SPI sběrnice se skládá ze skupiny více vodičů než u předchozí sběrnice I<sup>2</sup>C. Ty jsou potřebné pro správnou funkci sběrnice. Prvním vodičem je SCK (SCLK) (*Serial Clock*), tedy linka pro přenos hodinového signálu od *controlleru*. Dalšími je dvojice SDO a SDI (*Serial Data Out* a *Serial Data In*), dříve označovány jak MOSI a MISO, jejichž úkolem je přenos dat. Linka SDO přenáší data od *controlleru* k *targetu* a SDI naopak. Posledním důležitým vodičem je CS (*Chip Select*), dříve označovaný také SS, pomocí něhož se provádí výběr *targetu*, aby s ním mohla být navázána a započata komunikace [42].

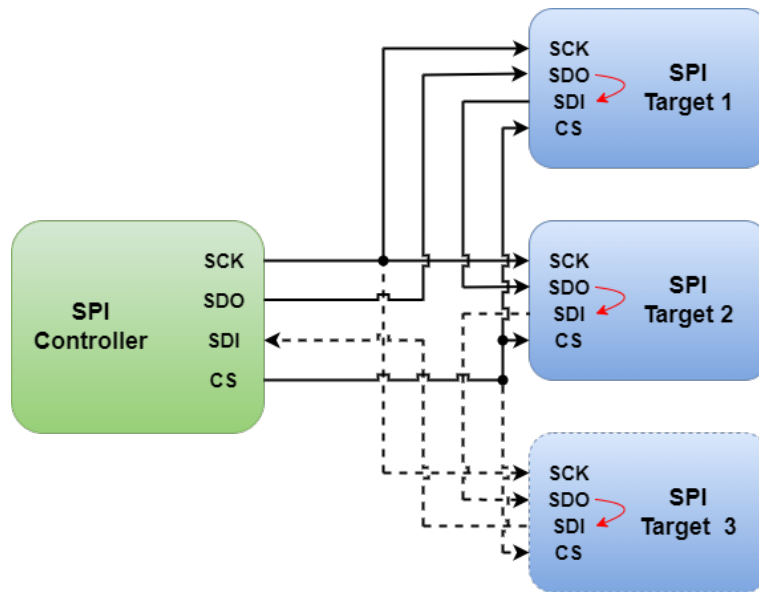
SPI sběrnici lze zapojit více způsoby. Základním je 4-vodičové zapojení, které lze rozdělit na dvě konfigurace, a to hlavně podle CS vodiče. První možná konfigurace zapojení je znázorněna na Obr. 5.6. Jedná se o obvyklé zapojení, kdy ke každému *targetu* vede jeden CS vodič, tedy klasické zapojení SPI sběrnice s vícero periferiemi.



Obr. 5.6: Sběrnice SPI, konfigurace s *Chip select* (překresleno z [42]).

Druhým zapojením může být konfigurace *Daisy chain* (viz Obr. 5.7), u kterého je CS vodič jeden a připojen na vícero *targetů* (periferií). Tato kombinace ušetří separátní vodiče pro CS. Každé z připojených zařízení odešle svoje data k dalšímu, které připojí svůj balík dat a opět přepošle dále, až se dostanou ke *controlleru*. Zapojení *Daisy chain* však musí být podporováno zařízením. U některých zařízeních se lze setkat s SPI, kde jsou využity 3 vodiče této sběrnice, SDI, SCK, CS. Je to z důvodu, že do zařízení není potřeba nic zapisovat, ale pouze z něj data vyčítat [43].





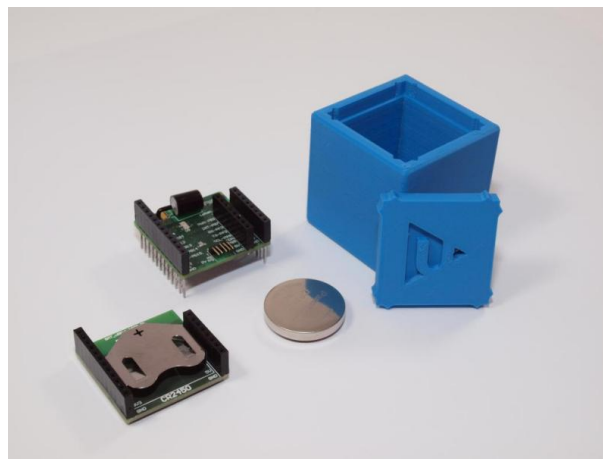
Obr. 5.7: Sběrnice SPI, konfigurace Daisy-Chain (překresleno z [42]).

Sběrnice disponuje vyšší rychlostí a přenosovou kapacitou dat než sběrnice I<sup>2</sup>C. Základní frekvenci SPI lze stanovit na 50 MHz, ale je možné dosahovat frekvencí až 80 nebo 100 MHz. Při takové frekvenci je poté datový přenos 50 až 100 Mbit/s. Ovšem přenosová rychlost závisí na použitém *controlleru*, který může svojí vnitřní frekvencí omezovat frekvenci sběrnice, jelikož ta je závislá na jeho výstupním hodinovém signálu [44].

Samotná sběrnice SPI je v dnešní elektronice velice používána a zatím nenahraditelná, jak svojí rychlostí a rozšířením v této oblasti, tak její relativní jednoduchostí. Jedním z nástupců, který by mohl SPI v určitých aplikacích nahradit, je zmíněná sběrnice I<sup>3</sup>C, i když zřejmě dojde spíše ke koexistenci obou sběrnic.

## 6 KETCube®

Jedná se o moderní vývojovou platformu zaměřenou na prototypování v oblasti IoT, která byla vyvinuta na Katedře materiálů a technologií (KET) Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni. Platforma je licencována jako tzv. *Open Source Hardware*<sup>1</sup>. Mezi její přednosti se řadí moderní a kompaktní design, univerzálnost, nízká spotřeba, podpora rozšířeného *open-standardu* mikroBUS a také možnost přímé komunikace do IoT sítí LoRaWAN a Sigfox. Samotný KETCube je využíván jak v rámci fakulty na mnoho projektů, mezi kterými lze zmínit třeba SmartCAPMUS<sup>2</sup>, tak na mnoho studentských prací. Je také využíván katedrou v rámci vývoje a testování. Všechny zdrojové soubory týkající se jak firmwaru, tak hardwarových částí, jsou spravovány na Githubu<sup>3</sup>. Při vývoji není ovšem nutné využívat přímo jen vytvořené části v rámci projektu KETCube, katedry či projektu SmartCAMPUS, ale je možné si vytvořit i vlastní hardware. Kreativita je čistě na autorovi, který bude pouze využívat KETCube jako řídicí desku do svého projektu. Jediným stěžejním bodem může být vlastní obslužný software, kdy ale může uživatel využít tzv. KETCube EDU<sup>4</sup>, tedy edukační balíček. Zmíněný balíček je určen pro začínající vývojáře a studenty, navíc díky podpoře prostředí Arduino IDE zajišťuje bezmezný a kreativní tvoření s touto platformou [45].



Obr. 6.1: Platforma KETCube (převzato z [45]).

<sup>1</sup>Open-source hardware (OSH) jsou volně přístupné veškeré zdrojové soubory.

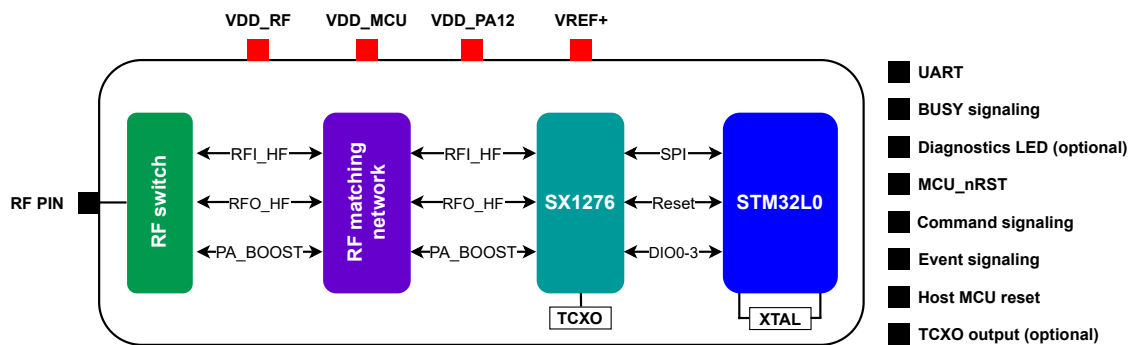
<sup>2</sup>Projekt SmartCAMPUS ZČU: <https://www.smartcampus.cz/>

<sup>3</sup>Dostupná dokumentace KETCube: <https://github.com/SmartCAMPUSZCU/KETCube-docs>

<sup>4</sup>Informační web ohledně KETCube EDU: <https://edu.ketcube.cz/>

## 6.1 Hardware

Samotný KETCcube má fyzické rozměry  $32 \times 32$  mm a jeho hlavním komponentem je modul od výrobce Murata Type ABZ CMWX1ZZABZ-078 [46], který obsahuje mikrokontrolér STM32L082CZ [47] a komunikační modul SX1276 [48, 49], který zajišťuje konektivitu do sítí LoRaWAN a Sigfox. Vnitřní nastínění zapojení modulu od Muraty je znázorněno na Obr. 6.2. S modulem Murata, resp. s jeho částí s čipem SX1276, je možné dosahovat v reálných aplikacích praktické citlivosti  $-136$  dBm. V čipu SX1276 je dále integrován zesilovač, jenž lze nastavit až na zesílení  $+20$  dBm. Nespornou výhodou tohoto modulu je tzv. *All in One*, tedy v jednom pouzdře se nachází jak řídicí mikrokontrolér, tak čip pro bezdrátovou komunikaci.



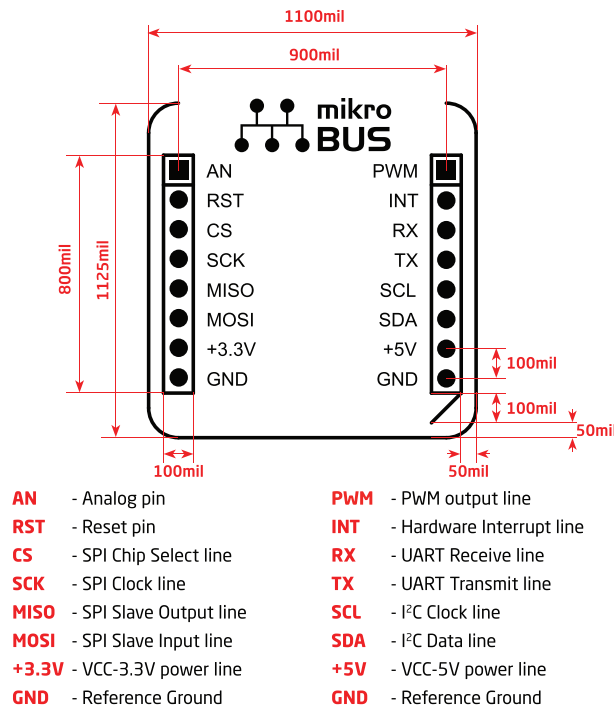
Obr. 6.2: Vnitřní diagram CMWX1ZZABZ-078 (překresleno z [46]).

Platforma podporuje také konektivitu se zařízeními dodržující „open standard“ mikroBUS™, který je vyvíjen a spravován srbskou společností MikroElektronika [50] a nabízí mnoho dostupných modulů od jednoduchých druhů senzorů, expanderů, VF modulů, power managementu, motorových kontrolerů a displejů, přes přesné ADC a DAC převodníky, až po složitější vývojové kity. MikroBUS je praktické rozmístění I/O pinů na desce plošného spoje, jak rozměrově, tak pozičně (viz Obr. 6.3). Jednotlivé piny mají přesně stanovenou pozici, ať už se jedná o napájecí linky (GND, 3V3, 5V), pin s funkcí *interruptu*<sup>5</sup>, výstupem s funkcí PWM<sup>6</sup> či pin s analogovým vstupem, tedy se vstupem na interní A/D převodník řídicí desky. V neposlední řadě podporu a rozmístění vývodů pro nejpoužívanější digitální sběrnice, jako je I<sup>2</sup>C, SPI a UART.

Na samotné desce KETCcube se dále nachází i senzor teploty a relativní vlhkosti

<sup>5</sup>Hardwarový vstup pro přerušování programu z vnější periférie nebo zařízení.

<sup>6</sup>Pulzně šířková modulace je diskrétní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvoustavového signálu.



Obr. 6.3: mikroBUS platforma (převzato z [51]).

od společnosti Texas Instruments HDC1080. U novějších revizí KETCube je možné se setkat s vylepšenou verzí senzoru - HDC2080. Dalším přínosem je osazená anténa sloužící pro komunikaci do sítí LPWAN. Ta může být případně nahrazena SMA či UFL konektorem pro připojení externí antény s větším ziskem [45]. Celkově se tedy jedná o ucelený a funkční hardware, který je stále upravován a zdokonalován s ohledem na další vývoj elektroniky v této oblasti. Samotný KETCube je dále doplněn velice modulárním a programovatelným firmwarem.

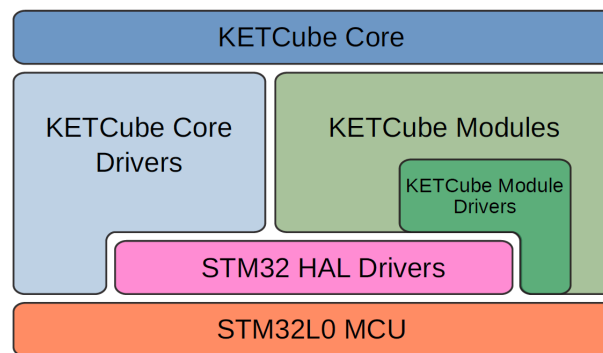
## 6.2 Firmware

Firmware KETCube, může být rozdělen na dvě hlavní části. První částí je samotné jádro (*Core*) firmwaru a druhou představují moduly (*Modules*). Grafické znázornění blokového schématu firmwaru lze nalézt na Obr. 6.4. Jádro KETCube je napsáno v rámci možností univerzálně a je ho možné využít i na jiný MCU, a to díky obsaženému mikroprocesoru z rodiny STM32L0. Hardwarová část, jenž je vázána k samotnému jádru KETCube, je označena jako *KETCube Core Drivers* a spadá do ní ovladač pro obsaženou EEPROM<sup>7</sup> paměť, umožňující uložení konfigurace. Dále do ní spadá ovlá-

<sup>7</sup>Elektricky mazatelná paměť určená pouze pro čtení. Používána pro udržení důležitých dat i po odpojení napájení.

dač pro řízení komunikace po sériové lince (UART), který je vyžadován pro funkci a připojení ke KETCube přes rozhraní příkazového řádku z nadřazeného uživatelského počítače, pro umožnění lepší konfigurace.

KETCube module implementuje i určitou funkcionalitu, např. pro síť LoRaWAN, vnitřní ADC nebo specifickou podporu pro I<sup>2</sup>C *slave* zařízení. Díky této implementaci může modul úzce spolupracovat s ostatním hardwarem pomocí základních ovladačů STM32 HAL, či dokonce s ovladači nižší úrovně. Dále je zde zavedeno rozdělení pro *KETCube Modules*, a to podle jejich účelu na: Snímací (*Sensing*), Komunikační (*Communication*) a Aktuátory (*Actuating*).



Obr. 6.4: Schéma firmwaru KETCube (převzato z [45]).

Firmware KETCube vykonává většinu práce v periodicky se opakujících úlohách, tedy je vykonána vždy jedna úloha na modul s periodou systému. Mezi těmito periodami zůstává KETCube v režimu nízké spotřeby energie, kdy ale umožňuje zpracovávat případná přerušení z vnějších periférií. S frekvencí danou periodou systému všechny snímací moduly produkují data, která jsou poté předávána komunikačním modulům a vysílána. U přijímaných dat je funkce inverzí, během které jsou data (příkazy) přijata komunikačním modulem, dále předána příslušným ovládacím (nebo konfiguračním) modulům (mezimodulové zprávy) a zpracována (provedena).

Vzhledem ke skutečnosti, že firmware KETCube je vysoce modulární a konfigurovatelný na úrovni zdrojového i binárního kódu, lze libovolný modul povolit/zakázat jednotlivě pomocí definic preprocesoru v době kompilace (modul připojený nebo ne), nebo pomocí rozhraní příkazového řádku KETCube na dobu chodu (modul On/Off).

Firmware je stále vyvíjen a vylepšován podle potřeb a vzniku dalších modulů pro co největší použitelnost a modulárnost jak v rámci vývoje na katedře, externích projektů, tak i pro zájemce o tuto platformu [45].

## 7 Energy harvesting

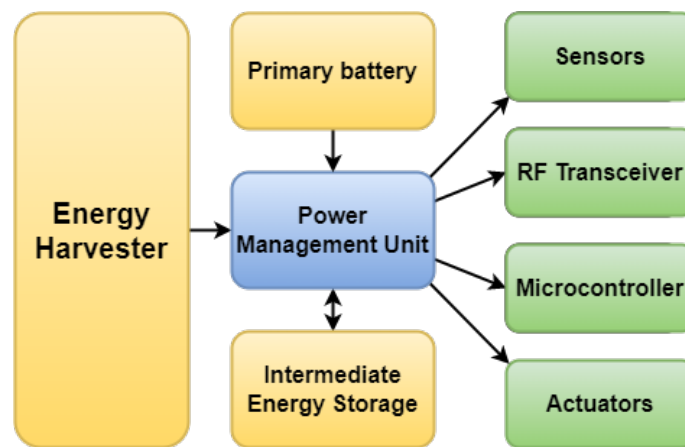
Moderní technologie se potýkají v oblasti nízkoenergetických zařízení, tedy hlavně zařízeních spadající do oblasti IoT, s určitými problémy ohledně elektrické energie. V ideálním případě by bylo nejvhodnější využít určitý zdroj „nevyčerpatelné“ energie, která by dokázala zařízení napájet dlouhou řadu let, bez jakéhokoliv zásahu člověka, ať už by se jednalo o výměnu baterie nebo o dobítí zařízení.

Jedním z možných řešení tohoto problému může být do značné míry tzv. *Energy Harvesting*, jehož koncept je naznačen na Obr. 7.1. *Energy harvesting* lze v přeneseném slova smyslu chápat jako „sběr“ energie z okolí zařízení, ve kterém se nachází. Někdy je možné se v odborné literatuře setkat i s pojmem enviromentální výroba energie (*Environmental power generation* [52]). Ve své podstatě se jedná o „sběr“ a přeměnu malého množství různých druhů energie z nekonvenčních zdrojů, jako je světlo, teplo, vibrace a mechanický pohyb či rádiové vlny na energii elektrickou. Jedním z obdobných příkladů pozorovatelný v globálním měřítku je výroba elektrické energie ve velkých solárních a větrných elektrárnách. U *energy harvesting* jde především o velmi malé shromažďování a zpracování malého množství energie z bezprostředního okolí a její co nejefektivnější přeměna na elektrickou energii. Ve většině případů je *energy harvesting* součástí samotného bezdrátového zařízení. S určitým druhem *energy harvesting* se bylo možné setkat již u kapesních kalkulaček, kde byl využit miniaturní solární panel (přeměna světla na el. energii) pro zvýšení a prodloužení výdrže instalované baterie. V dnešní době se *energy harvesting* dostává do širšího podvědomí hlavně díky rozvoji *smart* zařízení, chytrého oblečení či mnoho dalších aplikací, které to vyžadují. Vytváří zde vlastní zdroj elektrické energie či slouží, jak již bylo zmíněno, k prodloužení životnosti instalované baterie [52].

S jistou nadsázkou se v ideálním případě stanou konvenční zdroje elektrické energie jako například napájecí kabely, baterie, potažmo jejich výměna a dobíjení postradatelnými a budou zcela nahrazeny pomocí *energy harvesting*. Zařízení se v tu chvíli stane plně bezdrátovým a nezávisle pracujícím bez potřeby fyzického zásahu člověka. Tato vlastnost je především užitečná u zařízení, která jsou v málo přístupných místech či implementována do věcí s nerozebíratelnou povahou (zalitá zapouzdřovacím materiálem) z důvodu zvýšení jejich odolnosti v agresivním prostředí, kdy je požadována voděo-

dolnost a chemická stabilita pouzdra. Další výhodou je v ideálním případě jakákoliv absence údržby tohoto zařízení.

Některé z aplikací *energy harvesting* jsou již v dnešní době vcelku úspěšně realizovány a testovány v oblasti IoT. Očekává se i rozšíření do ostatních oblastí technologické sféry. Připojení každého zařízení k elektřině nebo pouhá výměna baterie se stává v dnešní době s velkým množstvím těchto zařízení nemalým problémem, ať už z technologického hlediska, tak i z pohledu ekologického dopadu na životní prostředí. *Energy harvesting* má tedy velký potenciál tyto potřeby eliminovat a stává se jedním z předmětů dalšího výzkumu pro budoucí technologický rozvoj [52].



Obr. 7.1: Systém Energy Harvestingu (překresleno z [53]).

## 7.1 Metody získávání energie

Metod získávání energie, respektive druhů zdrojů energie pro *energy harvesting*, existuje rozmanité množství. V ideálním případě je snaha využít a vytěžit co možná nejvíce energie z dostupných konvenčních i nekonvenčních zdrojů, kdy každý zdroj energie se vyskytuje v jiné formě, má jinou fyzikální povahu a dostupný výkon. Prakticky se většinou upřednostňuje ten druh energie, který je v okolí bezdrátového zařízení přítomen nejvíce, a je tak možná jeho efektivní a znatelná přeměna. Většinou však dochází k hybridnímu využití více zdrojů najednou. Tyto zdroje, vypsané v Tab. A.1 (umístěné v příloze), můžeme podle literatury [53] a [54] rozdělit na několik druhů specifických svým původem, dosažitelným výkonem a fyzikální podstatou.

### 7.1.1 *Harvesting* okolní energie

Mezi jeden z hlavních zdrojů energie v oblasti *energy harvesting* patří solární a RF (*Radio Frequency*) energie z rádiových vln. Tyto dva druhy jsou přirozeně nebo uměle přítomny v životním prostředí, a lze je tedy brát v úvahu při výrobě energie pro bezdrátové IoT zařízení [54].

- **Solární energie**

Jedná se o nejrozšířenější zdroj energie na Zemi. V České republice je průměrná intenzita slunečního záření přibližně  $300 \text{ W/m}^2$  a roční úhrn energie v rozmezí od 800 do  $1250 \text{ kWh/m}^2$  [55]. Tato energie se získává prostřednictvím helio-chemických (fotosyntéza), helio-elektrických (fotovoltaické konvertory) a helio-termálních (výroba tepelné energie, solární ohříváče vody) procesů. Helio-elektrický proces je založen na fotovoltaickém (PV) efektu, který lze pozorovat u dvou různých polovodičových materiálů, jenž díky tomuto jevu přeměňují dopadající sluneční paprsky na stejnosměrný proud (DC proud). Zařízení používající se pro výrobu elektřiny ze slunečního světla se nazývá solární článek nebo také fotovoltaický článek a jde o polovodičový materiál především na bázi křemíku [54].

- **Rádiové vlny**

Bezdrátový internet, rozhlasové a satelitní vysílání, digitální multimédia, mobilní a celulární sítě. V dnešní době se vyskytuje mnoho druhů zdrojů RF nebo elektromagnetických pulzů se spektrálním rozsahem od 3 kHz do 300 GHz. Velké spektrum těchto pulzů lze přeměnit na elektrickou energii pomocí antén a vhodných usměrňovacích obvodů. Tento typ energie se nepřetržitě vyskytuje všude kolem nás, s různou hustotou a úrovní. Energie může být tedy získávána bez omezení, ale s řadou nevýhod, jako je její nízká hustota a účinnost [54].

### 7.1.2 *Harvesting* mechanické energie

Jedním z dalších zdrojů energie pro *energy harvesting* mohou být mechanické vibrace a tlak, které jsou opět přirozeně se vyskytující složkou životního prostředí či různých mechanických aplikací. Takovýto zdroj může pak být využit spolu s jejich měřením v oblasti průmyslu spojením s IoT [54].



- **Mechanické vibrace**

Efektivním zdrojem energie mohou být mechanické vibrace, jelikož disponují velkou hustotou energie. S nadsázkou lze říci, že v určitých aplikacích mohou nahradit dříve zmíněné solární panely. Díky absenci vlivu na sluneční záření mohou být nasazeny i ve vnitřních prostorech či oblastech bez slunečního záření. Tento druh energie, ať už se jedná o nízko frekvenční ( $<100$  Hz) nebo vysokofrekvenční ( $>100$  Hz) vibrace, může být získán pomocí piezoelektrických, triboelektrických, elektromagnetických či elektrostatických měničů. [54].

- **Piezoelektrický princip (*PEH*)**

Funguje na základě kombinace mechanických a elektrických vlastností krystalů nazývaných piezoelektrický jev. Tento princip nevyžaduje ke své funkci externí zdroj napájení a je zde značná absence pohyblivých částí. Piezoelektrický člen generuje dostatečné napěťové impulzy (značnou napěťovou úroveň), které jsou dobře zpracovatelné a lze je snadno převést na stejnosměrný proud. Tento typ těží především z vysoké hustoty výkonu, jednoduchosti konstrukce, výroby a použitelnosti na širokou škálu frekvencí [54].

- **Elektromagnetický princip (*EMEH*)**

Základem tohoto principu je relativní pohyb vodičem (cívky) a magnetického pole, tvořeného většinou permanentním magnetem či elektromagnetem, jehož typ závisí na mechanických vibracích. K výhodám této metody patří generování značných elektrických proudových pulzů, robustnost zařízení a nízkonákladová konstrukce. Princip má ale i své nevýhody, mezi které se řadí především špatné transindukční vlastnosti magnetů a omezené rozměry v závislosti na velikosti IoT zařízení [54].

- **Elektrostatický princip (*ESEH*)**

Jde o metodu produkce energie na elektrostatickém principu, která využívá pohybu nabitých elektrod deskového kondenzátoru s proměnou strukturou proti elektrostatickým silám mezi elektrodami, mezi kterými je vzduch, vakuum nebo jiný dielektrický materiál. Oproti předchozím dvou principům je zde nutné externí stejnosměrné napětí dodávané z baterie k opačnému nabíjení desek kondenzátoru. Tento princip je schopný generovat relativně

vysoké výstupní napětí pro nízké frekvence s dobrou hustotou výkonu [54].

- **Tlakový princip**

U tohoto principu je využíváno především piezoelektrického jevu. Vstupní energií je zde tlak na piezoelektrický krystal, který nereaguje na vibrace, ale na dlouhodobější stlačení piezokrystalu [54].

### 7.1.3 *Harvesting* energie lidského těla

Jedním ze zajímavých zdrojů různorodé energie je lidské tělo, které lze přirovnat k energetickému skladišti a generátoru. Zajišťuje alternativní energii v podobě lidského tepla a pohybu. Tyto typy energií mohou být využity v oblasti nositelné elektroniky či u přímo implementovaných zařízení v lidském těle sloužící k monitorování aktivity a zdravotního stavu. Tento zdroj energie ale naráží na několik úskalí. Prvním je lidský pohyb, který má relativně nízkou frekvenci (typicky pod několik desítek Hz) a také je vysoce stochastický a nepravidelný. Dalším je teplota lidského těla, která je závislá na denním rytmu a může být tedy využívána jen v určitých případech [54].

- **Tělesné teplo**

Zdrojem energie je v tomto případě teplo vyzařované lidským tělem. Pro přeměnu tepelné energie na elektrickou jsou využívány principy fungující na základě termoelektrického jevu (*ThermoElectric Energy Harvester (TEEH)*), kdy je využito prostorově teplotního gradientu. Druhou možností je pyroelektrický jev (*Pyro-Electric Energy Harvester (PEEH)*), který je závislý na časových změnách tělesné teploty. Tyto principy mohou být využity k *energy harvesting* zejména ve zdravotnictví, tedy pro IoMT zařízení s přenosem ECG (*ElectroCardioGram*), EMG (*ElectroMyoGram*) a EEG (*ElectroEncephaloGram*) dat [54].

- **Biomechanický pohyb těla**

Pro *energy harvesting* biomechanické energie lze využít dvou zdrojů: kinetické a elastické energie. Vzhledem ke komplexnosti fyzikálních mechanismů zde nalézají uplatnění mnoho principů přeměny energie, mezi které lze zařadit elektromagnetické, elektrostatické, piezoelektrické a triboelektrické měniče. Z hlediska probíhající výzkumů se podle literatury [54] jeví jako nejvhodnější elektromagnetický

způsob přeměny energie.

#### 7.1.4 Bioenergetický *harvesting*

Jedná se o velice speciální a zajímavý druh *energy harvesting*, kde je jako baterie brán ekosystém rostliny (*plant as battery* viz literatura [56]). Zdrojem elektrických impulzů je tak samostatná rostlina generující výkon v rozmezí 800 až 1400 nW přes den. Tento typ *energy harvesting* by měl ulehčit a zjednodušit nasazení IoT senzorů v oblasti zemědělství, kde je běžné poskytování dat ohledně měření půdní a vzdušné vlhkosti a teploty nebo monitorování rostlin s detekcí škůdců [54].

#### 7.1.5 Hybridní *energy harvesting*

Při reálné aplikaci *energy harvesting* je většinou nezbytné využití hybridního řešení, tedy kombinace více zdrojů energie. Ve většině případů je využíváno solární energie, která má ovšem několik nevýhod, mezi které lze zařadit její nespolehlivost zapříčiněnou povětrnostními podmínkami a časoprostorovými faktory, tedy polohou Slunce během dne. Tyto nevýhody vedly k návrhu systémů zahrnujících více jednotek a kombinujících více obvodů, které generují další energii z RF či vibrací nebo z jiných transindukčních mechanismů pro její následnou přeměnu na elektřinu. Většina *energy harvesting* obvodů je v kombinaci s komponenty pro uložení energie, které mohou mít podobu superkondenzátorů (kapacita 1 F a více) nebo akumulátorů. Je nutné tedy vždy zvážit, do jakého prostředí má být IoT zařízení nasazeno a podle toho volit vhodně *energy harvesting* a jeho energetické měniče [54].

## 8 Primární baterie

Primární baterie, někdy také označovány jako nenabíjecí baterie nebo suché články, jsou chemické zdroje elektrické energie, které mají schopnost přeměnit při vybíjení chemickou energii na energii elektrickou. V současné době existuje mnoho primárních baterií založených na různých chemických reakcích a principech. Mezi jejich hlavní funkční části se řadí kladná (katoda) a záporná (anoda) elektroda a elektrolytický systém tvořený elektrolytem, separátory a obalem (nádobou). Primární články nelze opakovaně nabíjet, jsou nabity pouze jednou a po vyčerpání jejich energie musí být nahrazeny a ekologicky zlikvidovány. Své využití nacházejí v mnoha aplikacích, kde je potřebný levný a relativně lehký zdroj elektrické energie. K těmto aplikacím patří například přenosná elektronická zařízení, hračky, malá rádia či zálohování paměti u počítačů. Výhody primární baterie jsou dobrá skladovatelnost, vysoká hustota energie v článku, poměrně malé samovybíjecí vlastnosti, jednoduchá údržba a snadné použití. Tyto baterie lze rozdělit podle rozměrů, kdy převážnou většinu tvoří známé tužkové baterie (AA, AAA, atd.), knoflíkové nebo vícečlánkové baterie, jako např. 9V baterie. Další možné rozdělení je podle jmenovitého napětí, kterým disponují. Tato napětí se mohou pohybovat pro různé chemické složení od 1,35 V, přes nejznámější 1,5 V a 3,6 V, až po 4,0 V, případně další možná napětí [57–59]. Nejdůležitější rozlišení je však z pohledu elektrochemického systému. Toto rozdělení je znázorněno na Obr. 8.1 a lze podle něj baterie rozdělit do tří základních skupin:

- **Zinkové primární články**

Primární baterie se zinkovou anodou patří k nejznámější primárním bateriím. Z hlediska historie je významná především základní zinko-uhlíková baterii nazývaná také *Leclanchův* článek. Mezi další známé zástupce této skupiny se řadí také zinko-chloridové baterie či zinko-burelové články, tedy klasické primární baterie. Dále do této skupiny spadají oblíbené alkalické baterie zejména ve složení Zn/MnO<sub>2</sub>. Poslední zmíněné baterie disponují vcelku velkou měrnou energií, jsou cenově výhodné a šetrné k životnímu prostředí. Další předností těchto baterií je jejich odolnost proti samovolnému vytékání elektrolytu při skladování či používání při úplném vybití. Jejich skladovatelnost je až 10 let, jsou velmi bezpečné a lze je přepravovat i letecky. Mezi zinkové primární články patří také baterie na

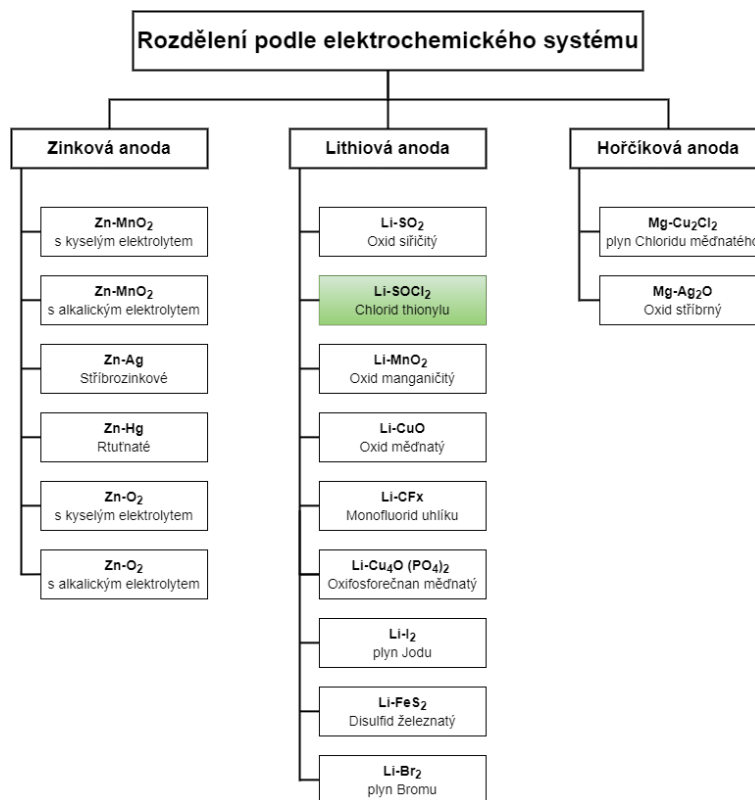
bázi Zn/Ag, které jsou většinou v podobě tzv. „konflikových“ baterií využitelných např. v náramkových hodinkách či v lékařských zařízeních [60].

- **Lithiové primární články**

Jedná se o velmi širokou skupinu elektrochemických zdrojů energie. Anoda u těchto primárních baterií je tvořena lithiem, což je jeden ze zástupců alkalických kovů disponující jedním z nejzápornějších elektrochemických potenciálů, což přináší výhodu v podobě vyššího svorkového napětí (3,6 - 4,2 V). U této skupiny je stěžejním bodem jejich výroba, která probíhá v ochranné atmosféře, jelikož obsažené lithium je velmi reaktivní, ať už s vodou, vzdušnou vlhkostí nebo samotným vzduchem. Je zde také nutné dbát na dobře hermeticky uzavřené obaly samotných baterií. Lithiová anoda může být kombinována s mnoha různými katodovými materiály. Díky tomu je tak možné vyrobit baterie s různými parametry a vlastnostmi. Mezi významné a zajímavé zástupce této elektrochemické konfigurace lze zařadit primární baterie jako např. Li/SoCl<sub>2</sub> nebo Li/MnO<sub>2</sub> [61]. Z důvodu zaměření této diplomové práce se v následující kapitole omezíme pouze na popis primární baterie na bázi Li–SOCl<sub>2</sub>.

- **Hořčíkové primární články**

Mezi primární baterie s hořčíkovou anodou spadají tzv. „Nálevné baterie“ s chemickým složením Mg/Cu<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> nebo Mg/Ag<sub>2</sub>O, které se do aktivního provozu uvádí vodou. Přidáním vody zde dojde k rozpuštění soli elektrolytu a baterie se tak stává aktivní. Mezi využití těchto baterií spadají především námořní záchranné radiobóje, kde dochází k aktivaci mořskou vodou. V současné době jsou tyto baterie však nahrazovány zejména lithiovými systémy baterií s dlouhou dobou skladovatelnosti [59].



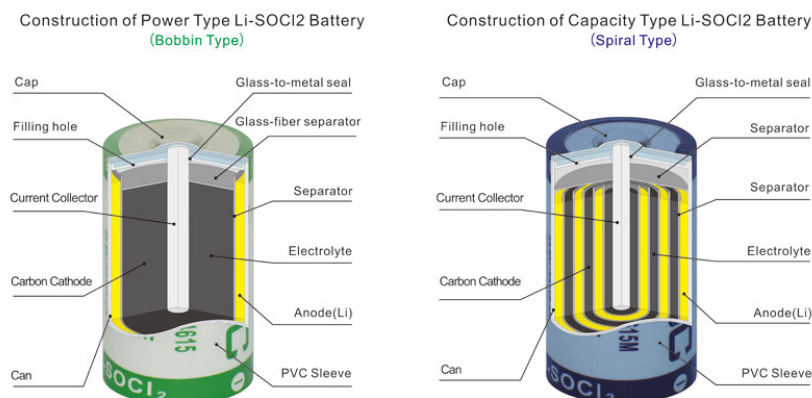
Obr. 8.1: Rozdělení primárních článků (překresleno z [59]).

## Primární baterie Li–SOCl<sub>2</sub>

Jde o primární baterie založené na kovové lithiové (Li) anodě a katodě obsahující pórovitý uhlíkový kolektor proudu, naplněný kapalným thionylchloridem (SOCl<sub>2</sub>). Nominální napětí článků je v základu 3,6 V. Mají válcovitý tvar ve velikostech 1/2AA až D, které se liší rozměry a poskytovanou kapacitou. Lithiové Li–SOCl<sub>2</sub> baterie představují nedobíjecí primární články disponující nejvyšším napětím a kapacitou ve srovnání s ostatními známými primárními bateriemi např. na bázi zinku. Vynikají svojí dlouhou dobou skladovatelnosti energie, se zárukou až 20 let, a disponují nejnižší mírou samovybíjení.

K dispozici máme dva typy lithium-thionylchloridových článků. První typ je tzv. „Bobbin“, znázorněn na Obr. 8.2 vlevo. Jeho konstrukce se podobá cívice a vyznačuje se dlouhodobou výdrží a malou samovybíjecí schopností, díky které je možná skladovatelnost až 20 let. Elektrochemický systém vykazuje u těchto článků nejvyšší energetickou hustotu ze všech dostupných primárních článků, a to až 650 Wh/kg nebo 1280 Wh/l. Dále jsou tyto články schopné odolávat širokému výkyvu teplot (od -60 °C do +85 °C)

a tlaků, kdy je dostupná i speciální verze tohoto článku s rozšířenou pracovní teplotou až do  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  a se zvýšenou odolností proti mechanickým rázům. Druhý typ představuje tzv. „Spiral“ (Obr. 8.2 vpravo). Jde o konstrukci spirálových elektrod, jež jsou vhodnější spíše pro energeticky náročnější aplikace [62], u kterých je potřeba vyššího špičkového proudu.



Obr. 8.2: Rozdíl v konstrukci článku  $\text{Li-SOCl}_2$  (převzato z [62]).

Za zmínku také stojí kombinace ( $\text{Li-SOCl}_2$ ) primárního článku a superkondenzátor, jehož úkolem je pokrytí špičkových proudů u náročnějších aplikací. V této kombinaci nedochází při proudových špičkách k tak razantnímu poklesu napětí na článku a jeho degradaci jako s jeho absencí [62].

Obecně jsou tyto baterie vhodné jako zdroj energie pro aplikace, které vyžadují dlouhodobý bezúdržbový provoz, např. vodoměry, teploměry, plynoměry a hlavně jako záložní napájecí zdroj pro paměťové integrované obvody či napájení nízkoenergetických IoT zařízení [63].

## 9 Metody pro určení stavu baterií

V současné době se vyskytuje velké množství bezdrátových zařízení, pro které je zdrojem elektrické energie především baterie. Tyto baterie je potřeba monitorovat, aby bylo možné dosáhnout jejich optimálního využití a také jejich patřičné ochrany. K tomuto účelu existuje větší množství různých metod pro jejich správu a monitorování. Tyto metody, potažmo tento systém správy baterie BMS (*Battery Management System*), je nezbytný pro přesný odhad stavu baterie, tedy jejího stavu vybití a zbývající energie. Je potřebný pro vyhodnocení stavu vnitřního energetického rozpoložení uvnitř baterie, či monitorování vnějších povětrnostních vlivů na baterii. Následující uváděné metody pro vyhodnocování stavu článku jsou ponechány v anglickém jazyce, jelikož jejich překlad do českého jazyka by mohl být zavádějící až chybný a i v české literatuře zabývající se obdobnou problematikou jsou uváděny stejné nebo obdobné anglické názvy metod.

Mnoho těchto měřicích, modelových a predikčních metod (algoritmů) bylo vyvinuto především pro sekundární (nabíjecí) články, ovšem některé se využívají i u primárních (nenabíjecích) článků. Je to především také z důvodu, že dnes se do popředí opět primární články vracejí [58, 64].

### 9.1 *State of Charge (SOC)*

Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů charakterizující stav baterie. S jeho definicí je ovšem spojeno mnoho různých problémů. V podstatě je *SOC* definováno jako poměr aktuální kapacity ( $Q(t)$ ) k nominální kapacitě ( $Q_n$ ), udáván většinou v %, a může být tedy reprezentováno následující rovnicí:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (9.1)$$

Stanovení *SOC* představuje složitý úkol závisející na typu použité baterie a aplikaci, v níž se baterie používá. V průběhu vývoje baterií jsou souběžně vyvíjeny i metody pro správné vyhodnocování a stanovení *SOC*, které je i jedním z hlavních úkolů těchto metod. Přesný odhad *SOC* může zabránit nepředvídatelným výpadkům energie, či nadměrnému vybíjení/nabíjení baterií, které může vyústit v nenávratné poškození vnitřní



struktury baterie. Obecný přístup k měření *SOC* spočívá ve velmi přesném měření jak coulombů a proudu, tak napětí za všech provozních podmínek. Naměřené hodnoty jsou pak dále zpracovány a použity pro lepší predikci *SOC*. Další údaje potřebné pro takový výpočet zahrnují teplotu článku, zda se článek nabíjí nebo vybíjí, stáří článku a další relevantní údaje získané např. od výrobce baterie. Někdy je možné získat od výrobce charakteristické údaje o tom, jak jsou jejich baterie konstruovány a jaké chemické reakce uvnitř probíhají, jelikož baterie často fungují za různých provozních podmínek. Nedostatečné informace o počátečním stavu *SOC*, samovybíjení článků a svodových efektech, vedou naopak k nepřesnostem a negativním vlivům na výslednou hodnotu *SOC* [64, 65].

### 9.1.1 *Direct measurement*

Metoda *Direct measurement* je jedním ze základních principů využívající některé vlastnosti baterie, mezi které lze zařadit vnitřní impedanci nebo napětí na výstupních svorkách - kontaktech baterie. Mezi nejběžnější metody, které spadají do této skupiny lze zařadit:

- **Open circuit voltage method (OCV)**

Tato metoda je založená na měření výstupního napětí baterie při nezatíženém stavu. Výpočet vychází z rovnice (9.2), z které je poté možné vypočítat hodnotu samotného *SOC*. U této metody je hodnota *VOC* (*Voltage open-circuit*) poté rovna *SOC*, ovšem k určení skutečné hodnoty *VOC* musí dojít k odpojení baterií a ustalování hodnoty napětí nejméně dvě hodiny, což je velmi nepraktické. Nevýhodou je také jistá nelinearita napěťové křivky u baterií založených na lithiových systémech, což znemožňuje její využití. Další problém vzniká při měření více baterií, kdy se baterie různí a dochází tak k prohlubování chyby odhadu *SOC*.

$$VOC(t) = a_1 \cdot SOC(t) + a_0, \quad (9.2)$$

kde  $SOC(t)$ , tedy *SOC* je funkcí času, konstanta  $a_0$  představuje napětí na výstupních svorkách baterie při  $SOC = 0\%$ , konstanta  $a_1$  se získá ze znalosti hodnoty  $a_0$ , a poté je možné vypočítat hodnotu  $VOC(t)$  při  $SOC = 100\%$ .

- **Terminal voltage method**

Metoda založená na měření poklesu výstupního napětí baterie. Pokles je zapříčiněn zejména vnitřní impedancí při vybíjení baterie, a tedy elektromotorická síla (EMF) je přímo úměrná výstupnímu napětí. Protože elektromotorická síla baterie je přibližně lineárně úměrná  $SOC$ , je i výstupní napětí úměrné této hodnotě. Nevýhodou této metody je, že vychází ze znalosti lineárního poklesu napětí při zatížení baterie, které při konci vybíjení (životnosti baterie) strmě klesá a vzniká tak i velká chyba  $SOC$  [64, 66].

- **Impedance method**

Je metoda která využívá měření napětí a proudu ke stanovení vnitřní impedance baterie. Napětí je měřeno pomocí změny proudu v malých časových intervalech ( $< 10$  ms). Poměr mezi napětím a proudem vede k hodnotě odporu, který reprezentuje stejnosměrnou kapacitu baterie. Krátký časový interval je potřebný k zachycení tzv. ohmického efektu (*Ohmic effect*), ale také k redukci vlivu přenosové reakce a chemické difuze. Hodnotu odporu ovlivňuje delší časový interval. Kromě toho má tato metoda dobrou přesnost  $SOC$  a přizpůsobivost pouze u konce vybíjení baterie, tedy ve strmém poklesu hodnoty napětí. Vzhledem k tomu, že se hodnota odporu pohybuje v jednotkách  $m\Omega$  je velice obtížné dosáhnout většího rozlišení a přesnosti v získání této hodnoty. Navíc se s délkou měření  $SOC$  mění i hodnota vnitřního odporu. Z důvodu těchto problémů se tato metoda již moc nepoužívá [64, 66].

- **Impedance spectroscopy method**

Tato metoda využívá k měření impedance široký rozsah frekvencí při různých vybíjecích (i nabíjecích) proudech. Hodnoty modelových impedancí se poté zjišťují metodou nejmenších čtverců na naměřených hodnotách.  $SOC$  lze poté nepřímo odvodit z naměřených hodnot vlastní impedance baterie a následnou korelací se známými hodnotami impedance reprezentující různé úrovně  $SOC$  [64, 66].

### 9.1.2 *Book-keeping estimation*

Metody spadající do této kategorie jsou založené na aktuálních datech o vybíjecím proudu z baterie. Umožňují zahrnout některé vnitřní závislosti baterie, jako je její samovybíjení, ztráta kapacity či změny proudového zatížení.

- **Coulomb counting method**

V překladu se jedná o tzv. metodu „počítání“ Coulombů, někdy též nazývanou jako ampérhodinová nebo proudově integrační metoda. Jde již o běžně používanou metodu spadající do skupiny SOC. Metoda využívá matematického integrování protékaného proudu z baterie do zátěže v závislosti na čase k výpočtu SOC.

$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (I_b - I_{loss}) dt, \quad (9.3)$$

kde  $SOC(t_0)$  je počáteční stav baterie,  $C_{rated}$  je nominální kapacita baterie,  $I_b$  odebíraný proud z baterie a  $I_{loss}$  je samovybijecí proud způsobenými chemickými reakcemi uvnitř baterie [65].

Metoda poté vypočítá zbývající kapacitu tak, že „naintegruje“ proteklý náboj. Přesnost této metody je závislá především na přesnosti měření proudu a odhadu počátečního stavu  $SOC$ , který může být ovlivněn teplotou a stářím baterie [64–66].

- **Modified Coulomb counting method**

Jedná se o upravenou verzi předchozí metody, do které jsou zahrnuty i ovlivňující vlivy, jako je teplota, původní stav baterie, provozní podmínky a další, které ovlivňují provozní stav baterie. U této metody se lze setkat s tzv. „upraveným“ proudem (*corrected current*), který je kvadraticky svázaný s vybíjecím proudem baterie.

$$I(t) = k_2 I(t)^2 + k_1 I(t) + k_0, \quad (9.4)$$

kde  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$  jsou konstanty hodnot stanovených z experimentálních dat pomocí měření. Díky tomu je tato metoda schopna podávat přesnější výsledky než původní [64, 66].

### 9.1.3 *Adaptive systems*

S rozvojem umělé inteligence (AI) se začali pomalu objevovat i různé adaptivní metody pro odhad SOC. Mezi nově vyvíjené metody patří Neuronové sítě, jak se zpětným šířením (*Back propagation neural network (BP)*) tak s radiální bází (*Radial basic function neural network*). Dále sem lze zařadit metody využívající tzv. Fuzzy logiku (*Fuzzy Logic*), která je založena na ohodnocování míry pravděpodobnosti (hodnocení 0 a 1). Poté i metody založené na tzv. vektorovém stroji (*Relevance Vector Machine (RVM)*), což je strojové učení, které používá Bayesovský závěr pro získání řešení regrese a pravděpodobnostní kvalifikace [67]. Další metodou může být i matematický model využívající Kalmanův filtr (*Kalman filter*). Veškeré tyto metody jsou stále na začátku a objevují se pouze experimentální pokusy. Výhodou všech těchto metod je jejich možnost využití u nelineárních *SOC*, kde vstupuje mnoho ovlivňujících faktorů (teplota, samovybíjení, špičkové proudy, chemická degradace, atd.), s kterou by si právě adaptivní systémy měly poradit mnohem lépe, než staticky nastavené konstanty [64, 66].

- **Neural network**

Jedná se o využití neuronové sítě postavené na komplexním matematickém modelu, díky kterému může řešit vztahy mezi komplexními vlastnostmi a faktory ovlivňující *SOC* baterie. Struktura neuronové sítě (BP) se skládá ze tří vrstev: vstupní, skryté a výstupní. Vstupní vrstva zahrnuje napětí baterie, vybíjecí proud, vnitřní impedanci a okolní teplotu. Počet skrytých vrstev závisí na systému a požadované přesnosti. Výstupní vrstva poté poskytuje hodnotu *SOC*. Cílem této metody je co nejvíce snížit chybu odhadu *SOC*. Veškerá přesnost této metody je ale závislá na vstupních testovacích - trénovacích datech a metodách experimentu. Při trénování neuronové sítě je tak kladen velký požadavek na data testovaných baterií s co nejširším rozsahem výrobců [64, 66].

- **Support vector machine**

Tato metoda se používá pro klasifikaci rozpoznávání vzorů a regresní úlohy, přičemž je využívána zejména v nelineárních systémech z důvodu nižší citlivosti na malé změny. Tato metoda je více robustnější než systém odhadu, který využívá metodu nejmenších čtverců. Jeho využití je možné i u odhadu *SOC*, jelikož odstraňuje nevýhody metody *Coulomb counting* (uvedené v předchozí podkapitole

9.1.2) a tím pádem podává i přesnější výsledky SOC [64, 66].

- **Fuzzy neural network**

Fuzzy neuronová síť (FNN) nalézá využití zejména v aplikacích při identifikaci neznámých hodnot systému. Může také efektivně přizpůsobit nelineární systém tím, že vypočítá jeho optimalizační koeficienty a uzpůsobí tak učení algoritmu. Její aplikace je i u predikce SOC především bateriových systémů, kdy bylo využito *soft computingu* s FNN [64, 66].

- **Kalman filter**

Metoda využití Kalmanova filtru by mohla napomoci sledovat odhady SOC v reálném čase, což je za normálních okolností velice obtížné. Své uplatnění nachází například při korelaci s hodnotami chemických reakcí vztažených k tloušťce aktivní vrstvy v baterii. Tyto hodnoty se poté kombinují s naměřeným napětím na svorkách baterie a s proudem, díky čemuž je poté možné vcelku přesně určit hodnotu SOC [64, 66].

#### 9.1.4 *Hybrid methods*

Cílem *hybrid methods* je využití výhod předešlých metod. Jejich vhodnou kombinací je poté možno docílit co nejlepších výsledků při určování SOC. Předešlé metody mají vždy nějaké omezení a proto je účelem *hybrid methods* využít maximum dostupných informací, které jsou poté integrovány do komplexního modelu, čímž dojde k zlepšení odhadu SOC [64, 66].

- **Coulomb counting and EMF combination**

Jedná se o metodu odhadu SOC kombinující metody *Direct measurement* s měřením EMF (*Electromotive force*) baterie v rovnovážném stavu a *Book-keeping* metody, především tedy s metodou *Coulomb counting*. Za účelem přesnějšího výpočtu SOC včetně zbývající doby provozu (*Remaining Run-Time (RRT)*) je zaveden adaptační algoritmus přizpůsobení  $Q_{max}$ , který bere v potaz i stárnutí baterie a dochází tak k zpřesnění odhadu jak SOC tak RRT [64, 66].

- **Coulomb counting and Kalman filter combination**

Princip spočívá ve využití Kalmanova filtru u metody *Coulomb counting*. To způsobí zpřesnění této metody a dochází tak k lepším odhadům SOC, přičemž důvodem je lepší konvergence naměřených hodnot ke skutečným [64, 66].

## 9.2 *State of Health (SOH)*

Dalším parametrem charakterizující baterie v průběhu jejich životnosti tzv. *State of Health*, zkráceně SOH udávaný v procentech. Je využíván zejména u sekundárních (nabíjecích) baterií, avšak je v určitých mezích použitelný i pro primární (nenabíjecí) baterie. Zatímco předchozí SOC metody slouží zejména k určení nabitého či vybitého stavu, potažmo měření aktuálního vybíjení, SOH lze chápat jako „zdravotní stav“ baterie po celou dobu užívání. Jeho definice je dána zejména degradací vnitřní struktury baterie, což zhoršuje její výkon a snižuje kapacitu v závislosti na zvyšujícím se vnitřním odporu [68, 69]. Proto se k vyjádření životnosti, tedy kapacity a vnitřního odporu, využívá právě SOH, které lze definovat více způsoby:

- **Definice SOH pomocí kapacity**

První možná definice parametru SOH je v závislosti poměru na kapacitě baterie.

$$SOH = \frac{Q_m}{Q_r} \cdot 100\%, \quad (9.5)$$

kde  $Q_r$  je jmenovitá kapacita baterie a  $Q_m$  maximální dostupná kapacita baterie naměřená za daných podmínek. Ovšem vzhledem k vlivu teploty na kapacitu a měřící proud se mohou opět naměřené hodnoty SOH lišit. Zajímavý poznatek je uveden v normě IEEE 1188.1996, kde je stanoveno, že pokud má Lithium-iontová baterie nižší hodnotu SOH než 80 %, dospěla baterie své životnosti a je nutná její výměna [68, 69].

- **Definice SOH pomocí vnitřního odporu**

Alternativní definice parametru SOH je na základě vnitřního odporu baterie.

$$SOH = \frac{R_e - R}{R_e - R_n} \cdot 100\%, \quad (9.6)$$

kde  $R$  značí vnitřní odpor baterie při současném stavu a  $R_n$  vnitřní odpor nové baterie. Většina metod pro stanovení SOH je založena právě na základě odhadu a měření vnitřního odporu baterie. Nárůst vnitřního odporu je také jedním z důležitých ukazatelů stárnutí baterie a také jeden z důvodů její výkonové degradace [68, 69].

I u SOH se vyskytuje množství faktorů, které ovlivňuje její výslednou hodnotu. Mezi tyto faktory řadíme také samotné měření, a tedy určení specifického SOH. Tento parametr není měřitelný senzory, ale pomocí nepřímého měření napětí, proudu a teploty v korelaci s dalšími relativními parametry, které lze získat např. integrací, aproximací, či jinými modelačními metodami [68, 69].

Mezi další vlivy lze zařadit také časové změny ve stavu baterie a vnitřní chemické rozložení včetně nelineárního průběhu napětí během vybíjení [68, 69].

### 9.2.1 *Internal Resistance Measurement*

Tato metoda je založena na měření vnitřního odporu baterie jakožto jednoho z významných ukazatelů SOH, kdy s jeho nárůstem dochází k poklesu této hodnoty. Zároveň je závislý na stárnutí a degradaci. Je považován za jeden z významných ukazatelů SOH. Ovlivňuje zejména pokles napětí baterie na zatížení a je silně závislý na stárnutí a degradaci. S nárůstem odporu dochází k poklesu hodnoty SOH a proto je k tomuto účelu i využíván [68, 69].

- **Current pulse method**

Nejvíce využívaná metoda spočívá v tzv. proudového pulzu, při němž je měřen úbytek napětí na baterii a poté je podle rovnice (9.7) vypočten vnitřní odpor [68, 69].

$$R_b(SOC, T) = \frac{OCV(SOC, T) - V_{bat}(SOC, T)}{I_{pulse}}, \quad (9.7)$$

kde  $R_b$  vyjadřuje vnitřní odpor baterie a  $OCV$  napětí baterie bez zatížení. Dále  $V_{bat}$  je napětí baterie při  $I_{pulse}$ , který vyjadřuje zatěžovací proud [68, 69].

- **Joule's law method**

Druhou metodou spadající do tohoto typu měření je využití Jouleových ztrát, vyjádřené rovnicí (9.8). Jedná se o tepelné ztráty vyvolané proudem protékajícím

přes vnitřní odpor samotné baterie při jejím provozu [68, 69].

$$\frac{dQ_{joule}}{dt} = I_{bat}^2 \cdot R_b, \quad (9.8)$$

kde  $dQ_{joule}$  je vyjádření tepelných ztrát generovaných baterií,  $I_{bat}$  vybíjecí proud a  $R_b$  vnitřní odpor baterie.

Tato metoda je ovšem využívána zejména v laboratorních podmínkách z důvodu potřeby přesného měření pomocí kalorimetrických metod [68, 69].

### 9.2.2 *Internal Impedance Measurement*

Metoda založená na měření vnitřního odporu a reaktance baterie. Při stárnutí baterie dochází ke zvyšování vnitřní impedance baterie a tedy ke klesání hodnoty SOH. Nejčastější metodou, která spadá pod toto měření je EIS (*Electrochemical impedance spectroscopy*). Jedná se o nedestruktivní metodu, která měří impedanci přivedením střídavého proudu sinusového průběhu a měří výstupní napětovou odezvu. Impedance je poté funkcí frekvence. Hlavní přínosem této techniky je především přesné určení jevu stárnutí baterie [68, 69].

### 9.2.3 *Model-based method*

Metoda založená především na modelu vycházejícího z degradačního modelu baterií, který umožňuje odhadnout a „předpovědět“ stav SOH. Přesnost odhadu závisí především na co nejpřesnějším modelu vnitřního rozložení klíčových parametrů reprezentujících vnitřní stárnutí. Jedná se o velice pokročilou metodu, která zahrnuje model elektrochemické impedanční spektroskopie (EIS), model termoelektrické vazby, Theveninův model a zkratový model s přechodnými jevy (RC obvod) [68, 69]. Podle rozdílu mezi teorií konstrukce modelu a principem algoritmu při predikci stavu lze rozdělit do dvou kategorií:

- **Electrochemical model method**

Metoda založená na elektrochemickém modelu vycházejícího především z mechanismu elektrochemických reakcí uvnitř baterie. To je základem teoretického



modelu a znalosti vnitřního rozložení baterie. Teorie porézní elektrody a kinetické znalosti jsou brány v úvahu pro vytvoření fyzikálního modelu potřebného k popsání vnitřních parametrů. Tyto parametry reprezentují dynamický proces stárnutí a selhání baterie, což se nechá využít k odhadu a určení SOH [68, 69].

- **Equivalent circuit model method**

Metoda založená na ekvivalentním obvodu pro modelování vycházející z pohledu elektrotechniky. Baterie je zde brána jako *black box*, tedy černá skříňka a podle závislosti výstupně-vstupních vlastností, potažmo vztahů je navrženo náhradní zapojení, tedy matematický model. Tento model je poté využit k popisu poklesu kapacity baterie. Stavové rovnice jsou založeny na základě prvního a druhého Kirchhoffova zákona. Může zde být využito většiny matematických aparátů, které souvisejí s danou problematikou. V kombinaci se známými veličinami, které bylo možné měřit, byly extrapolovány parametry související s odhadem SOH a jeho určením [68, 69].

#### 9.2.4 *Data-driven method*

Jedná se o metodu využívající moderních technologií uzpůsobených pro sběr velkých objemů dat a jejich následné analýzy. Díky těmto možnostem není nutné využívat složitých elektrochemických popisů baterií a změn uvnitř baterie. Jde zejména o využití naměřených dat, jak z provozu, tak z výzkumných institutů. Díky tomu je možné provést analýzu dat pomocí různých metod, mezi než řadíme: *Statistical filtering method*, *Neural network method*, *Vector machine method* a *Statistical method*. Tyto metody jsou již z hlediska jejich vývoje využívány na obdobné problémy. Je tedy možné vytrénovat neuronové sítě, či využít statistických metod a následně z jejich výsledků předpovídat hodnotu SOH u baterií. Samozřejmě se jedná o metody, které jsou stále ve vývoji a experimentálně ověřovány. Dnes zejména díky již zabudovaným AI akceleratorům i do cenově dostupných mikroprocesorů se může jednat o vcelku kvalitní nástroj pro predikci a určování tohoto parametru [68, 69].

# 10 Rešerše vybraných integrovaných obvodů

Na trhu se vyskytuje mnoho integrovaných obvodů od různých renomovaných výrobců zabývajících se touto problematikou. Ovšem většina těchto obvodů je myšlena spíše na sekundární („nabíjecí“) články. Lze je sice do jisté míry možné použít k monitorování primárních („nenabíjecích“) článků, ovšem bude zde docházet k větším nepřesnostem, což zapříčiní nárůst celkové chyby v monitorování zbývající energie, jelikož každá baterie je specifická svými parametry, chemickým složením, konstrukcí a chováním při vybíjení.

Nicméně dva z předních výrobců integrovaných obvodů se zaměřili i na problematiku monitorování primárních článků, především na bázi (Li–SOCl<sub>2</sub>). Prvním výrobcem je Linear Technology, dnes již součástí společnosti Analog Devices. Dalším výrobcem na poli monitorování kapacity primárních článků je společnost Texas Instruments. Obě společnosti jsou zkušenými hráči v těchto oblastech jak analogových, tak digitálních integrovaných obvodů s různými vlastnostmi a parametry.

Pokud pomineme finančně a výpočetně složité měřicí karty, které jsou nasazovány zejména při laboratorním výzkumu a měření článků, tak se v portfoliu těchto výrobců vyskytují levná integrovaná řešení nabízející relativně jednoduché nasazení v IoT zařízení, s komunikací obvodu především přes sběrnici I<sup>2</sup>C. Zatímco společnost Linear Technology (AD) šla cestou zejména jednoduchého integrovaného řešení v jednom čipu, kdy není potřeba žádných vnějších součástek pro realizaci měření (pokud pomineme základní blokační kondenzátory a *pull-up* rezistory), Texas Instruments zvolil cestu externího bočníku s možností měření teploty pomocí externího NTC s konfigurací různých parametrů a režimů, včetně proprietárního řešení právě pro baterie (Li–SOCl<sub>2</sub>). Více o rešeršovaných obvodech je obsaženo v následujících podkapitolách.

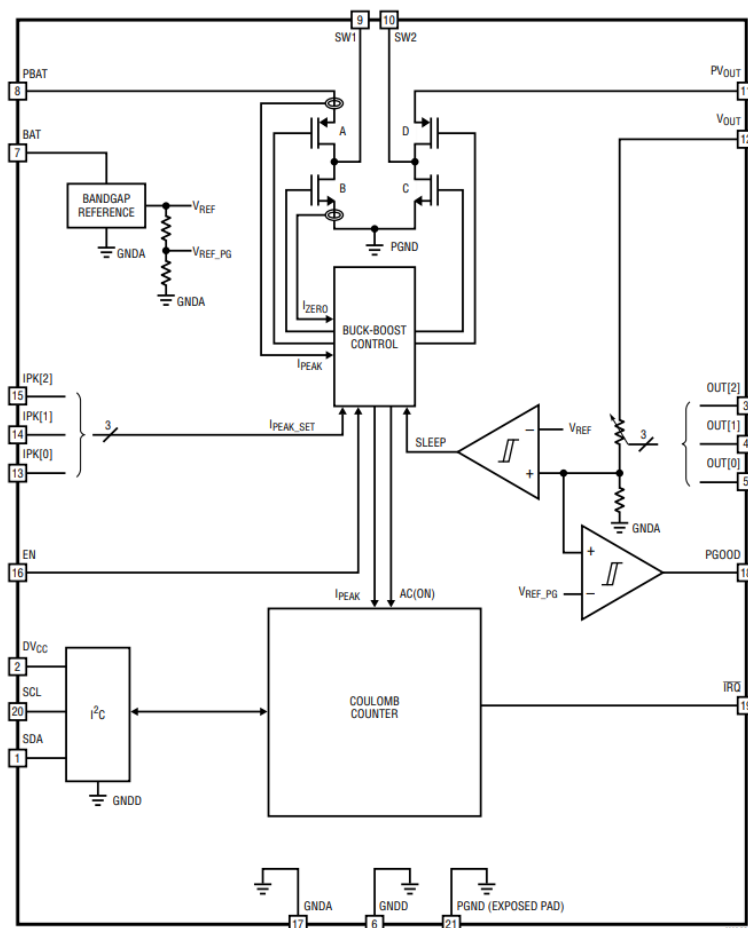
## 10.1 LTC3335

Jedná se o integrovaný obvod od společnosti Linear Technology disponující integrovaným DC/DC Buck-Boost<sup>1</sup> měničem a přesným *Coulombmetrem*. Obvod by podle výrobce a přiloženého datasheetu [71] měl mít vlastní spotřebu, resp. odběr ve stavu „shutdown“, tedy ve vypnutém stavu, typicky 440 nA. V případě „sleeping“, tedy stavu, kdy je funkční měnič, ale bez připojené zátěže na výstupu, odběr přibližně 680 nA. Pokud dojde k připojení zátěže, zvedne se i odebíraný proud samotného obvodu na 350 až 540  $\mu$ A. To je způsobeno hlavně zatížením DC/DC měniče a ovládáním řídicích elektrod MOSFET tranzistorů uvnitř obvodu.

Vstupní napětí je akceptováno obvodem v rozsahu od 1,8 V do 5,5 V, což plně pokrývá rozsah všech typů jednočládkových baterií. Naproti tomu výstupní napětí je možné nastavit na požadovanou hodnotu v rozsahu od 1,8 V do 5 V, a to dvěma způsoby. Prvním způsobem je hardwarová konfigurace pinů *OUT0*, *1*, *2*, (datasheet [71] strana 14), kdy připojením pinů na napájecí napětí(logická „1“) nebo připojením ke GND (logická „0“) nastavíme pevně požadované výstupní napětí. Druhý způsob představuje zápis bitového slova do příslušného konfiguračního registru (registr A).

Obvod dále disponuje konfigurovatelnou špičkovou hodnotou výstupního proudu pomocí pinů *IOUT1*, *2*, *3*, v rozsahu od 5 mA do 250 mA. Kontinuální maximální odebíraný proud při maximálním dovoleném špičkovém proudu (250 mA), vstupním napětím z baterie 3,6 V a výstupním napětím 3,3 V je přibližně 50 mA. Jedná se o obdobnou konfiguraci pinů jako v případě výběru výstupního napětí. Bohužel v závislosti na DC/DC měniči je zde přítomna i vnější indukčnost, kterou je potřeba zvolit podle potřebného proudu  $I_{PEAK}$ , resp. podle tabulky 8, v datasheetu [71] na straně 18. Konfigurace a následný výčet akumulovaného náboje (registr C) se provádí přes sběrnici I<sup>2</sup>C. Obvod je umístěn v pouzdře QFN-20 (3 mm × 4 mm) [71].

<sup>1</sup>Jedná se o DC/DC měnič, který dokáže dodávat regulované stejnosměrné napětí, které je buď pod úrovní vstupního napětí nebo nad ním. Tedy dokáže napětí snížit nebo zvýšit[70].



Obr. 10.1: Blokové schéma LTC3335 (převzato z [71]).

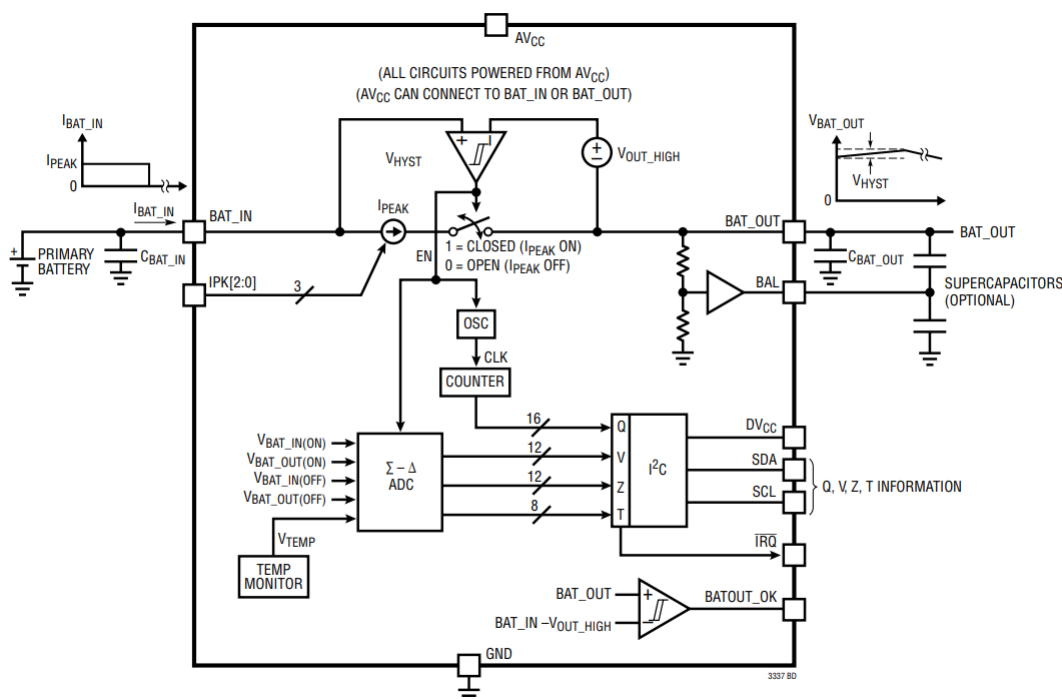
## 10.2 LTC3337

LTC3337 představuje integrovaný obvod opět od společnosti Linear Technology. Tento integrovaný obvod v sobě obsahuje SOH monitor (popsaný v předchozí kapitole) primárních článků (baterií) a přesný čítač *Coulombmeter*. Obvod je koncipován jako měřicí prvek, který je topologicky umístěn mezi primární baterií a samotnou zátěží (elektroniku).

Vstupní napětí obvodu je v rozsahu od 1,8 V až po 5,5 V, a tedy pokrývá celé spektrum napětí jednočlávkových baterií na bázi lithia. Samotný obvod má ideální odběr v klidovém stavu okolo 100 nA. Dále disponuje podobnou funkcí jako předchozí popsaný obvod, tedy konfigurace *IPEAK* se provádí opět pomocí hardwarových pinů s 3 bitovým slovem, kterým je možné nadefinovat špičkový proud v rozsahu od 5 mA do 100 mA. Poskytuje naměřené hodnoty prošlého náboje z baterie do zátěže  $Q$  a dále pak vstupní i výstupní napětí na pinech obvodu. Z naměřených hodnot je poté možné

vypočítat vnitřní impedanci baterie  $Z$  a v neposlední řadě teplotu samotného čipu. Obvod všechny tyto hodnoty poskytuje přes digitální sériovou sběrnici I<sup>2</sup>C. Další zajímavou možností představuje připojení výstupních superkondenzátorů z důvodu pokrytí krátkodobých špičkových výkyvů proudového zatížení. Z tohoto důvodu je zde i pin  $BAL$  připojen mezi dva sériově spojené superkondenzátory, které balancuje. Balancující proud na tomto pinu je maximálně 10 mA.

Je možné zde naprogramovat předděličku *Coulombmeteru* z důvodu využití širokého spektra baterií s různými kapacitami a dále pak programovatelný alarm pro upozornění na dosažení spodní hranice kapacity baterie. Stav alarmu je poté oznámen na interruptovém pinu. Obvod se nalézá v 12 pinovém pouzdře LFCSP s rozměry 2x2 mm [72].



Obr. 10.2: Blokové schéma LTC3337 (převzato z [72]).

### 10.3 BQ35100

Jedná se o plně konfigurovatelný integrovaný obvod od společnosti Texas Instruments využitelný pro monitorování spotřeby a zbytkové energie především v primárních člancích. Obvod poskytuje data o protékaném proudu měřeného pomocí externího bočníku připojeného na piny  $SRP$  a  $SRN$ . Dále obvod poskytuje hodnotu napětí baterie,

kteřé je měřeno pinem *BAT*, ovšem pouze pokud je měřené napětí do 5 V. Je-li potřeba měřit vyšší napětí například složeného *battery packu*, je nutné využít externí napěťový dělič, který je možné ovládat pinem *VEN* a poté měřit napětí pinem *VIN*. Mimo interní teploty samotného čipu je zde možnost měření i externí teploty využitím pinu *TS* s připojeným externím NTC termistorem. Veškeré měření dat a obsluha obvodu se provádí přes sběrnici I<sup>2</sup>C a samotné měření se spouští externě přes pin *GE* - *Gauge enable*. V neposlední řadě pak obvod obsahuje i konfigurovatelný interruptový pin *ALERT* [73].

Obvod disponuje třemi funkčními a využitelnými konfiguračními měřicími režimy, závislými na požadavku aplikace a použitého typu primárního článku.

- **Režim ACC - *Accumulator***

Prvním režimem je ACC neboli akumulátorový mód, který je určen pro veškeré druhy baterií včetně nabíjecích. V této konfiguraci měří integrovaný obvod veškerý proud protékající externím bočníkem a dále měří napětí a teplotu. Nepřetržitě tak monitoruje a zároveň kalkuluje veškerý vyextrahovaný náboj z baterie. Základem tohoto principu je *Coulomb counter*, tedy stanovení přesně proteklého náboje, který je poté přepočítán na  $\mu\text{Ah}$ . Spotřeba obvodu v tomto režimu je  $\sim 0,3 \mu\text{A}$  [73].

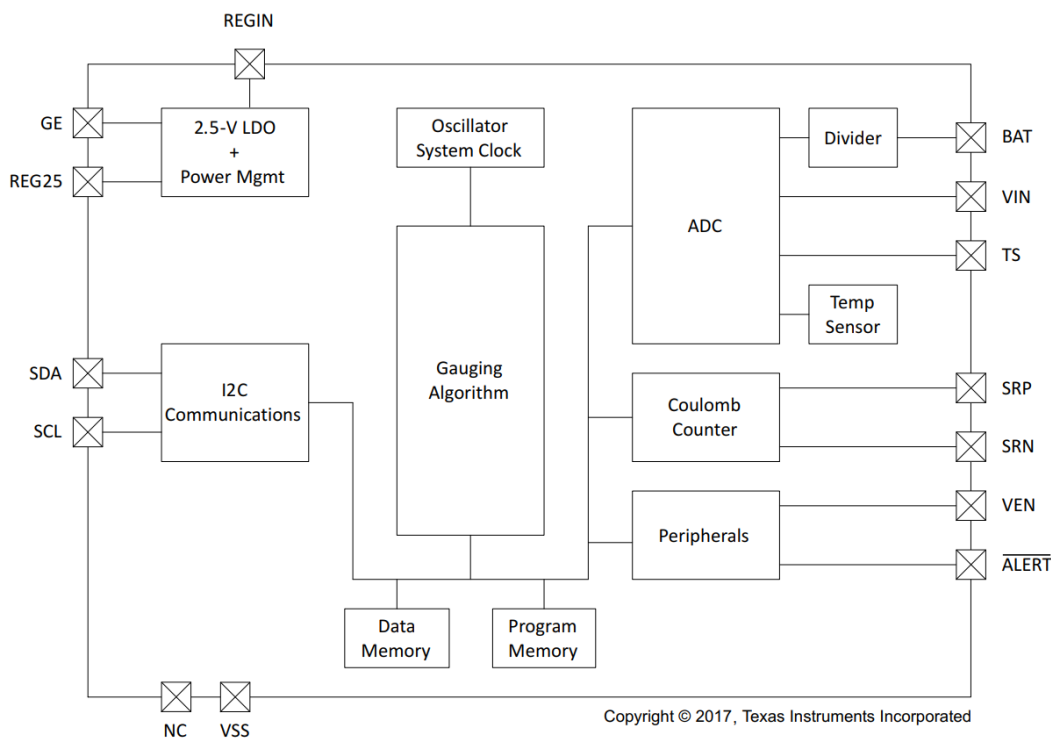
- **Režim EOS - *End of Service***

Druhý režim *End of Service* je využitelný specificky u Li-SOCl<sub>2</sub> baterií. Je zde využito proprietárního algoritmu vyvinutého společností *TI* a naměřených vybíjecích křivek specifických baterií, které je nutné do obvodu před měřením nahrát. Poté zde dochází ke korelaci protékaného proudu, měřeného napětí a teploty. Z těchto údajů se následně vypočítá impedance primárního článku a porovná s nahranými hodnotami v paměti obvodu. Výstupem tohoto režimu je pouze informace na pinu *ALERT* či změny hodnoty příslušného registru s označením *EOS*. Vlastní spotřeba je  $\sim 0,35 \mu\text{A}$  [73].

- **Režim SOH - *State of Health***

Posledním režimem je *State of Health*, použitelný u primárních článku Li-MnO<sub>2</sub>, kdy je využito korelace mezi napětím a teplotou. Tyto údaje jsou poté využity k výpočtu *SOH*, jehož hodnota je procentuálně vyjádřena v příslušném registru. Spotřeba vlastního obvodu při tomto režimu je  $\sim 0,06 \mu\text{A}$  [73].

Samotný integrovaný obvod poskytuje oproti předchozím dvou obvodům více údajů o aktuálně měřených hodnotách, a pokud je v režimu *ACC*, tak i s relativně rychlou opakovací frekvencí. U režimů *EOS* a *SOH* jsou údaje aktualizovány v závislosti na ovládní pinu *GE* pro snížení vlastní spotřeby obvodu. Je však nutné vycházet z doporučení výrobce a příslušného návodu k režimu uvedeného v datasheetu. V neposlední řadě lze uvést, že obvod je umístěn v poněkud větším pouzdře TSSOP-14 [73].



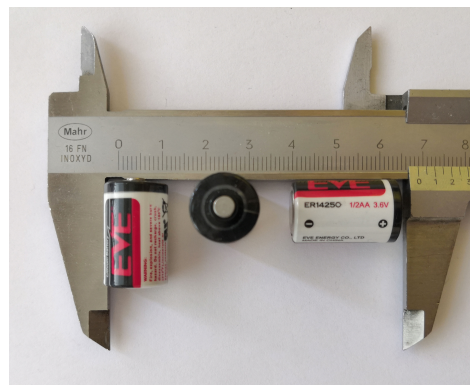
Obr. 10.3: Blokové schéma BQ35100 (převzato z [73]).

# 11 Rešerše vybraných primárních článků Li-SOCl<sub>2</sub>

Primárních článků na bázi Lithium-thionylchloridu (Li-SOCl<sub>2</sub>) se na trhu vyskytuje nepřehledné množství od různých výrobců. Mezi nejznámější výrobce lze zařadit SAFT, EVE a Tadiran. Jeden ze základních rozdílů spočívá v pouzdře baterie, tedy v rozměrech (½AA, AA, C, D) disponující různou kapacitou, pohybující se řádově od jednotek do desítek ampérhodin (Ah). Pro porovnání je na Obr. 11.1 vyfocena primární baterie o velikosti ½AA a AA.



(a) Oproti alkalické baterii velikosti AA.



(b) V porovnání s posuvným měřítkem.

Obr. 11.1: Porovnání velikosti ½AA baterie Li-SOCl<sub>2</sub> (foto autora).

Pro následující rešerši byly vybrány články o velikosti ½AA, které jsou plánovány pro využití u platformy KETCube. Specificky jde o články s jmenovitým napětím 3,6 V, nominální kapacitou 1,2 Ah a vnitřní konstrukcí typem *Bobbin*. Značeny jsou různými písmeny v závislosti na výrobcí: ER (výrobce EVE), LS (výrobce SAFT) atd., ovšem základní číslo 14250 je stejné. Toto číslo udává, o typ a rozměr pouzdra baterie v mm se jedná. V tomto případě jde o průměr 14,5 mm × 25 mm v délce. Je možné se setkat i s baterií od společnosti Tadiran pod názvem TL-4902 nebo TL-5902/S. Porovnání různých výrobců a „stejných“ primárních článků je zobrazeno v Tab. 11.1. Přestože řada prodejců udává, že baterie jsou vzájemně kompatibilní, je tomu tak pouze z pohledu velikosti pouzdra ½AA a jmenovitého napětí. Při pohledu do srovnávací tabulky Tab. 11.1 je patrné odlišností baterií od různých výrobců v

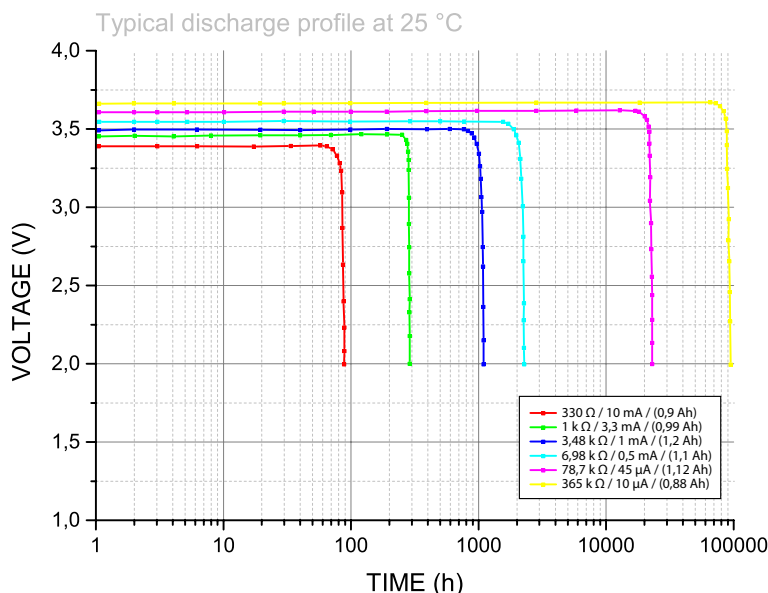


klíčových parametrech, jako je jejich doporučený maximální vybíjecí proud a pulzní vybíjecí proud. Nepatrné rozdíly jsou i ve váze jednotlivých článků. Vnitřní rozložení baterie ER14250 lze nalézt na Obr.A.1 uvedeného v příloze [74–79].

Tab. 11.1: Porovnání primárních baterií velikosti 1/2AA se jmenovitou kapacitou 1,2 Ah, převzato z [74–79]

Značení	LS14250	ER14250	TL-4902	TL-5902/S	UHE-ER14250-H	XL-050F
Výrobce	SAFT	EVE	TADIRAN	TADIRAN	UltraLife	Xeno energy
Nominální napětí [V]	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Kapacita [Ah]	1,2Ah@1mA, +20°C	1,2Ah@1mA, +25°C	1,2Ah@0,5mA, +25°C	1,2Ah@0,5mA, +25°C	1,2Ah@0,5mA, +23°C	1,2Ah@1mA, +20°C
Maximální doporučený konstantní vybíjecí proud [mA]	35	15	20	50	50	30
Maximální pulzní proud	100mA/100ms pulz s pauzou 2 min.	50mA/100ms pulz s pauzou 2 min.	50mA/100ms	100mA/ –ms	100mA/ –ms	60mA/100ms pulz s pauzou 2 min.
Provozní teplota [°C]	od -60 do +85	od -60 do +85	od -55 do +85	od -55 do +85	od -55 do +85	od -55 do +85
Skladovací teplota [°C]	max. +30	max. +30			max. +30	max. +30
Hmotnost [g]	8,9	10	9,6	9,2	10	9

Primární baterie ER14250 je už z podstaty chemického složení charakteristická svou vybíjecí křivkou lišící se oproti jiným druhům elektrochemických baterií. Tato křivka je uvedena na Obr. 11.2. Jak je ze znázorněných křivek patrné, nominální kapacita 1,2 Ah je zaručena při konstantním vybíjecím proudu 1 mA. Se zvyšováním vybíjecího proudu dochází ke snižování hodnoty kapacity, kdy pro vybíjecí proud 10 mA je tato kapacita přibližně 0,9 Ah. Ovšem nominální kapacita baterie klesá i při snižování zatěžovacího proudu, kdy například při hodnotě 10  $\mu$ A je jmenovitá kapacita 0,88 Ah. Pro nejvyšší maximální dovolený vybíjecí proud s hodnotou 15 mA by podle datasheetu měla baterie disponovat poloviční nominální kapacitou, tedy 600 mAh [74].



Obr. 11.2: Vybíjecí charakteristika baterie ER14250 (překresleno z [74]).

V případě použití tohoto druhu primární baterie je nutné vzít v potaz špičkový proudový impuls, který je schopna baterie dodat. U rešeršované baterie ER14250 je

maximální dovolený zatěžovací proudový impulz 50 mA po dobu 100 ms s časovou prodlevou 2 minut. Při nedodržení těchto podmínek dochází k degradaci elektrolytu a zanášení vnitřní pórovité uhlíkové katody. To poté zapříčiní následnou degradaci samotné baterie. V potaz je nutné vzít i teplotu, při které bude baterie provozována, jelikož skladováním při vyšších teplotách než 30 °C dochází opět k degradaci kapacity baterie.

Při využívání baterií na bázi Lithium-thionylchloridu je vždy nutné dodržovat všechny výrobcem předepsané hodnoty parametrů uvedené v datasheetu. V případě nesplnění parametrů není možné zajistit správnou funkci primární baterie včetně její nominální kapacity. Díky tomu bude docházet k nepředvídatelným jevům v elektrochemickém systému, což zapříčiní dřívější výpadek této baterie z provozu.

# 12 Praktická realizace

Tato kapitola je věnována praktické části diplomové práce. Postup je chronologicky seřazen tak, jak byl realizován. Od samotného návrhu desek plošných spojů, přes jejich oživení a programovou obsluhu, až po finální srovnání a měření s vybraným primárním článkem.

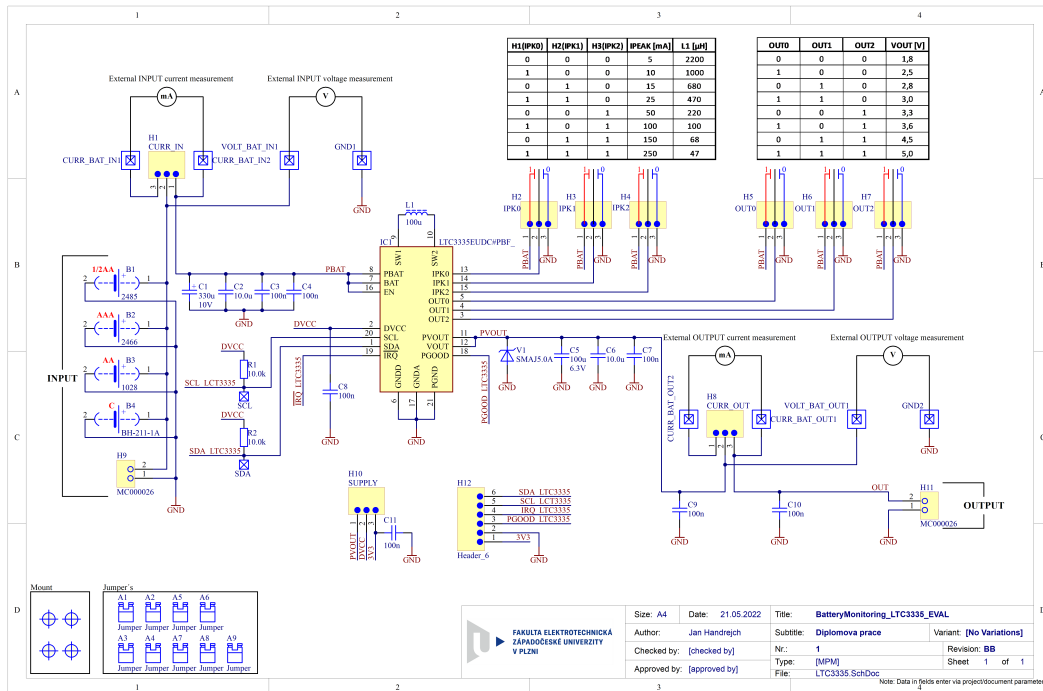
## 12.1 Návrh DPS

Návrh desek plošných spojů (dále jen DPS) byl realizován v programu Altium Designer® pro všechny tři integrované obvody uvedené v kapitole 10. Pro tyto vybrané obvody byly nakresleny příslušné knihovny, tedy jak schématické značky, tak jejich *footprints* pouzder. Poté následoval prvotní návrh DPS, a to kreslením základních schémat, kdy se vycházelo z evaluačních desek jednotlivých výrobců. Prvním bylo schéma zapojení pro obvod LTC3335 uvedené na Obr. 12.1, další schéma pak pro obvod LTC3337 (Obr. 12.2) a posledním schéma pro obvod BQ35100 znázorněno na Obr. 12.3. U schémat přitom byla snaha o dodržení stejného „rozložení“ pro lepší orientaci. Dále byly do schémat doplněny základní informace o konfiguraci, zejména pro obvody LTC, dále pak základní výpočet odporu bočníku u obvodu BQ35100. Všechny tři desky byly doplněny o měřící body z důvodu následné validace, bateriovými pouzdry pro různé velikosti baterií včetně připojitelných šroubových terminálu, jak pro vstup z baterie, tak výstup pro připojení zátěže. Sběrnice I<sup>2</sup>C byla vyvedena na příslušnou pinovou lištu, včetně všech dostupných IO pinů daného integrovaného obvodu. Dále byly desky doplněny přepínáním pomocí *jumperu*, jak pro napájení (Externí/Interní) z důvodu lepšího testování a oživování, tak pro přivedení napětí a proudu na měřící *Test pointy*, či pro nastavení  $I_{PEAK}$  a  $V_{OUT}$  u LTC obvodů. Vše bylo zamýšleno a realizováno zejména s ohledem na co nejlepší flexibilitu pro měření a testování vybraných integrovaných obvodů.

### 12.1.1 Návrh s LTC3335

Při návrhu s integrovaným obvodem LTC3335 bylo nutné zajistit správnou funkci DC/DC měniče obsaženého v tomto obvodu. Klíčovým komponentem je indukčnost  $L_1$ , pro kterou byla vybrána hodnota  $100 \mu\text{H}$ , a to na základě hodnoty  $I_{PEAK}$  pro  $100 \text{ mA}$  pomocí tabulky 8, na straně 18 v datasheetu [71]. Tuto hodnotu je samozřejmě možné i vypočítat podle vzorce uvedeného na stejné straně. Přímý výpočet ovšem není zapotřebí, jelikož v již zmíněné tabulce jsou hodnoty pro všechny  $I_{PEAK}$  uvedeny přímo od výrobce.

Dalšími částmi návrhu, které bylo potřeba vzít v potaz u tohoto obvodu, jsou výstupní filtrační kondenzátory ( $C_5$ ,  $C_6$ ,  $C_7$ ). Hodnota  $C_5$  byla zvolena  $100 \mu\text{F}$  v podobě keramického MLCC kondenzátoru třídy X7R v pouzdře 1206. Dodejme, že výrobcem je doporučena vyšší kapacita než  $22 \mu\text{F}$ . Kapacita kondenzátoru závisí na špičkovém proudu  $I_{PEAK}$ , který je případně nutné pokrýt. Dále byla do schématu přidána TVS dioda  $V_1$  z důvodu možných napěťových špiček na výstupu obvodu při jeho náběhu či při přepínání výstupního napětí ( $1,8 \text{ V}$  až  $5 \text{ V}$ ). Mezi další komponenty lze zařadit *pull-up* rezistory o hodnotě odporu  $10 \text{ k}\Omega$  a velikosti 0603. Tyto rezistory zajišťují správnou funkci I<sup>2</sup>C sběrnice. Obvod je poté doplněn pasivními komponenty, tedy zejména blokačními kondenzátory o hodnotě  $100 \text{ nF}$ , dále pak šroubovými svorkovnicemi, pinovými lištami a bateriovými pouzdry.

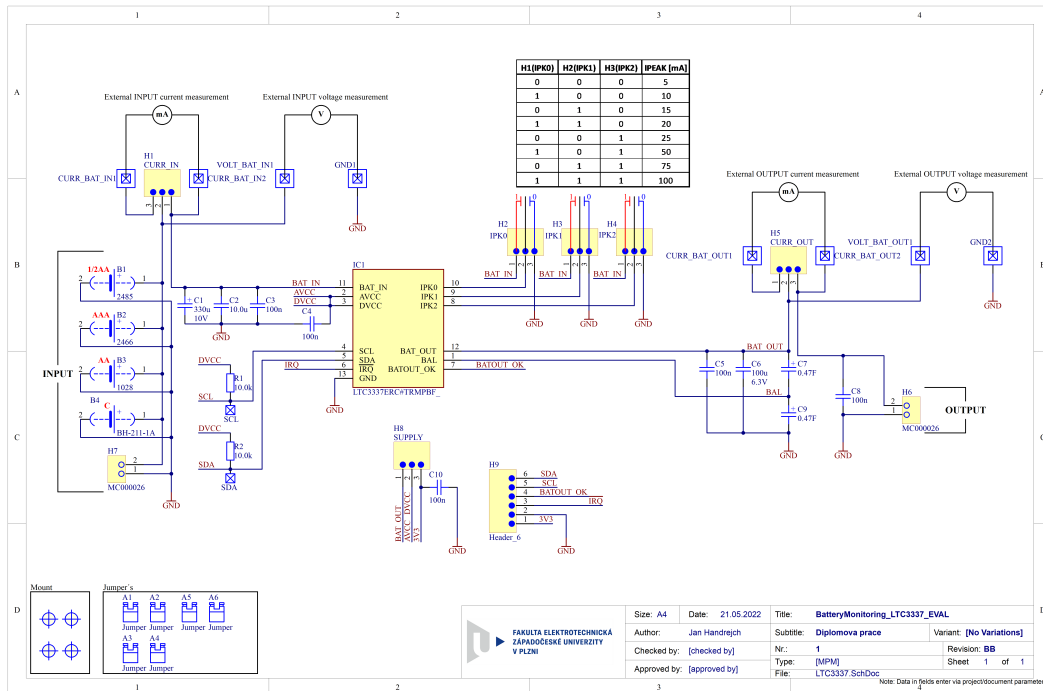


Obr. 12.1: Schéma zapojení s obvodem LTC3335

### 12.1.2 Návrh s LTC3337

Návrh s obvodem LTC3337 je prakticky obdobný, zejména na vstupní části, tedy od baterie až po integrovaný obvod. Obvod LTC3337 však nedisponuje DC/DC měničem, ale chová se zde pouze jako „pasivní“ měřicí obvod celkové energie tekoucí z baterie do zátěže. Výstupní keramický MLCC kondenzátor  $C_6$  disponuje kapacitou  $100 \mu\text{F}$ . Tato hodnota kapacity byla zvolena opět na základě doporučené hodnoty v tabulce 11, strana 6 v příslušném datasheetu [72] s ohledem na hodnotou výstupního špičkového proudu  $I_{PEAK}$  100 mA.

Mezi zajímavé vlastnosti tohoto obvodu patří jeho možnost připojení výstupních superkondenzátorů pro pokrytí proudových špiček. Balancování superkondenzátorů má na starosti pin *BAL*. Superkondenzátory byly zvoleny s kapacitou 0,47 F na napětí 3,5 V od výrobce KEMET, přesněji FCS0V474ZFTBR24. Další komponenty pro doplnění funkčnosti obvodu jsou *pull-up* rezistory o hodnotě 10 k $\Omega$  ve velikosti 0603 zajišťující správnou funkci I<sup>2</sup>C sběrnice. Dalšími pasivními komponenty jsou zejména blokační kondenzátory 100 nF v pouzdře 0603, dále pak vstupní a výstupní šroubová svorkovnice, pinové lišty a příslušná bateriová pouzdra.



Obr. 12.2: Schéma zapojení s obvodem LTC3337

### 12.1.3 Návrh s BQ35100

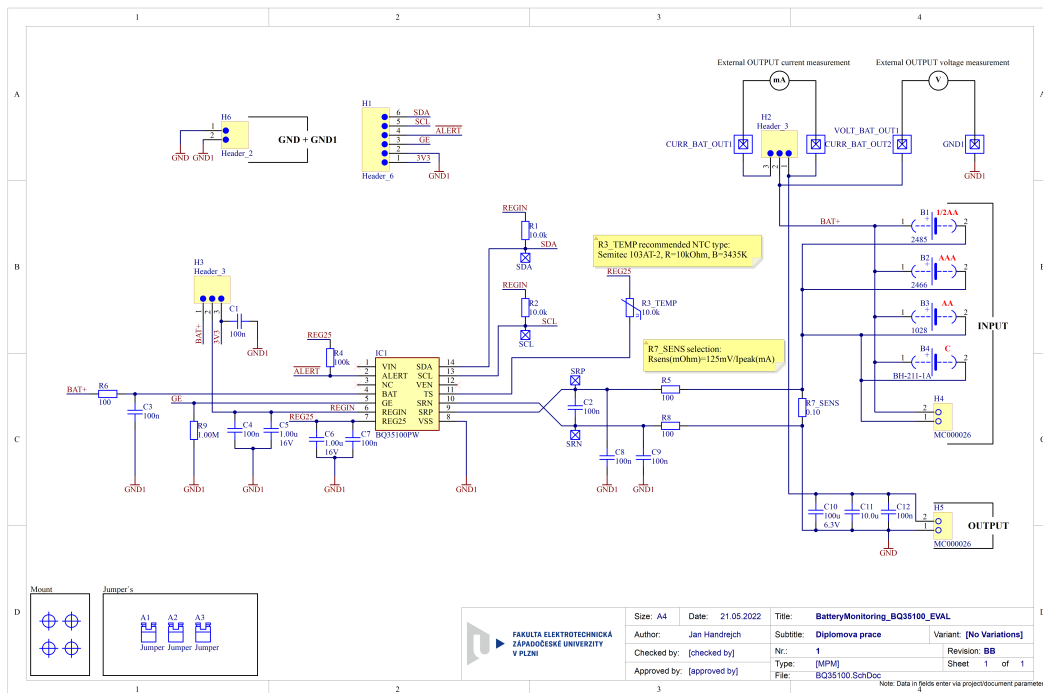
Návrh s obvodem BQ35100 je oproti předchozím dvou odlišný. Tento obvod využívá tzv. *low side* měření proudu pomocí externího bočnicku. Odpor rezistoru proudového bočnicku byl zvolen o hodnotě 100 mΩ, vzorec 12.1. Protékaný proud zde poté vytváří úbytek napětí, které je snímáno vnitřním ADC na pinech *SRN* a *SRP*.

$$R_{SENS} = \frac{125}{I_{PEAK}}, \quad (12.1)$$

kde  $R_{SENS}$  značí odpor bočnicku v mΩ, hodnota 125 mV ( $\pm 125$  mV) v čitateli reprezentuje maximální dovolenou hodnotu napětí na vstup měřícího ADC a  $I_{PEAK}$  poté představuje maximální špičkovou hodnotu proudu uvedenou v mA, která se může vyskytnout. Výpočet je převzat ze strany 20, kapitola 8.2.2.5 z příslušného datasheetu [73].

Dalším bodem návrhu bylo poté připojení externího teplotního čidla v podobě NTC termistoru, který tento integrovaný obvod podporuje. Výrobce je doporučen NTC od společnosti Semitec 103AT-2 s nominální hodnotou odporu 10 kΩ a koeficientem  $\beta = 3435$  K. Pro měření napětí byl využit pin *BAT*, jelikož napětí baterie nepřesáhne 6 V.

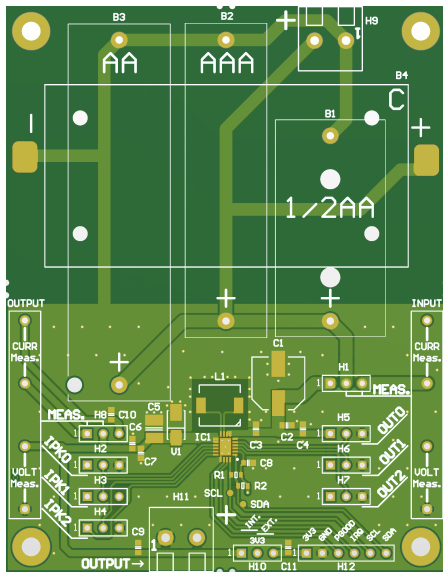
Pro tento účel je možné využít i pin  $VIN$ , který se využívá společně s pinem  $VEN$  pro ovládání externího napěťového děliče. Dále integrovaný obvod disponuje vlastním regulátorem (stabilizátorem) napětí na pinu  $REG25$  sloužícího pro napájení I<sup>2</sup>C sběrnice a senzoru teploty. Jako výstupní kondenzátor  $C_{10}$  byl opět zvolen MLCC třídy X7R o kapacitě 100  $\mu$ F v pouzdře 1206. K základním komponentům zajišťujících správnou funkci sběrnice patří *pull-up* rezistory o hodnotě 10 k $\Omega$ , dále pak blokační keramické kondenzátory 100 nF, velikostí 0603 a výstupní šroubové svorkovnice včetně bateriových držáků.



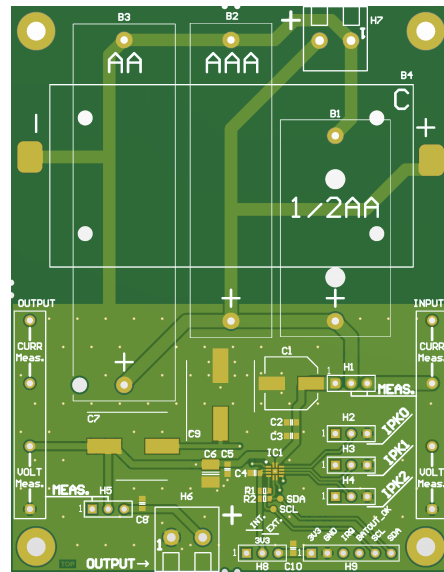
Obr. 12.3: Schéma zapojení s obvodem BQ35100

### 12.1.4 Realizace a výroba DPS

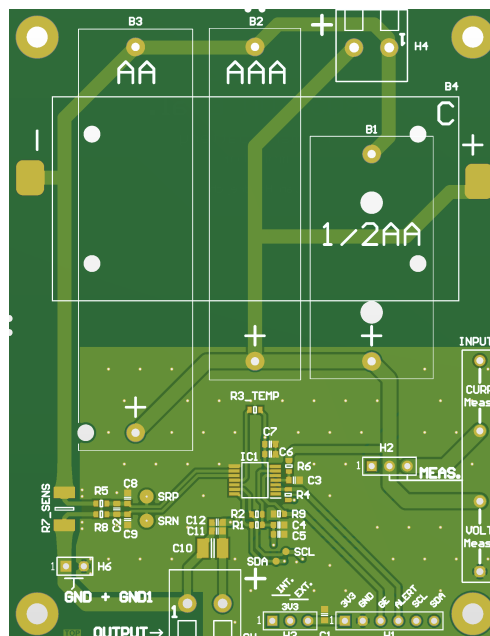
Po návrhu elektrických schémat a jejich validaci bylo přistoupeno k návrhu samotných DPS. Desky byly realizovány jako oboustranné s rozměry  $70 \times 90$  mm. 3D vizualizaci nakreslených DPS je možné vidět na obrázcích: Obr. 12.4a, b, c, a následnou panelizaci pro výrobu na Obr. 12.5. Fotografie jednotlivých vyrobených a osazených DPS jsou k nalezení na obrázcích v příloze: pro LTC3335 na Obr. A.3, LTC3337 na Obr. A.4 a BQ35100 na Obr. A.5.



(a) 3D vizualizace DPS s LTC3335.



(b) 3D vizualizace DPS s LTC3337.

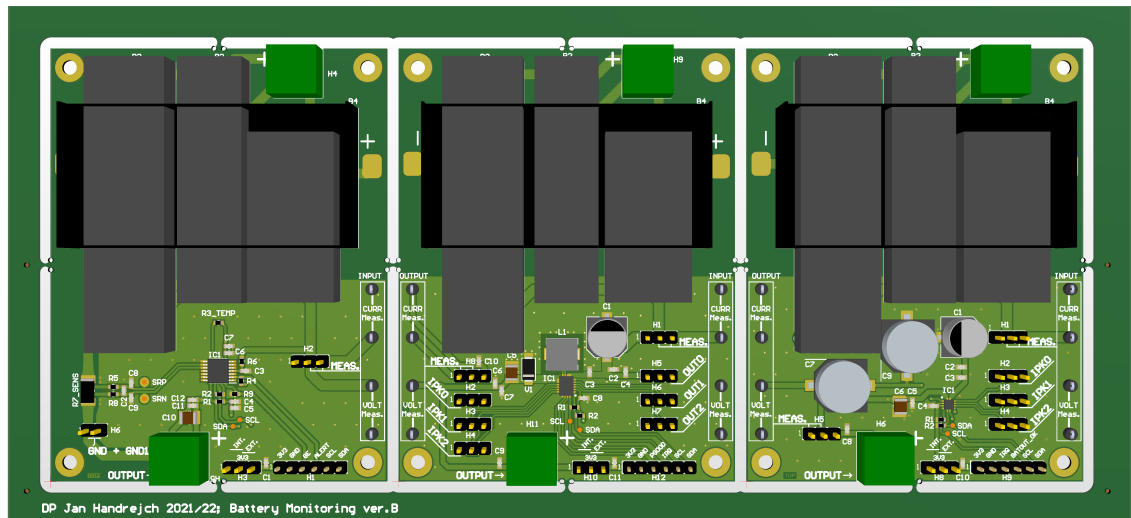


(c) 3D vizualizace DPS s BQ35100.

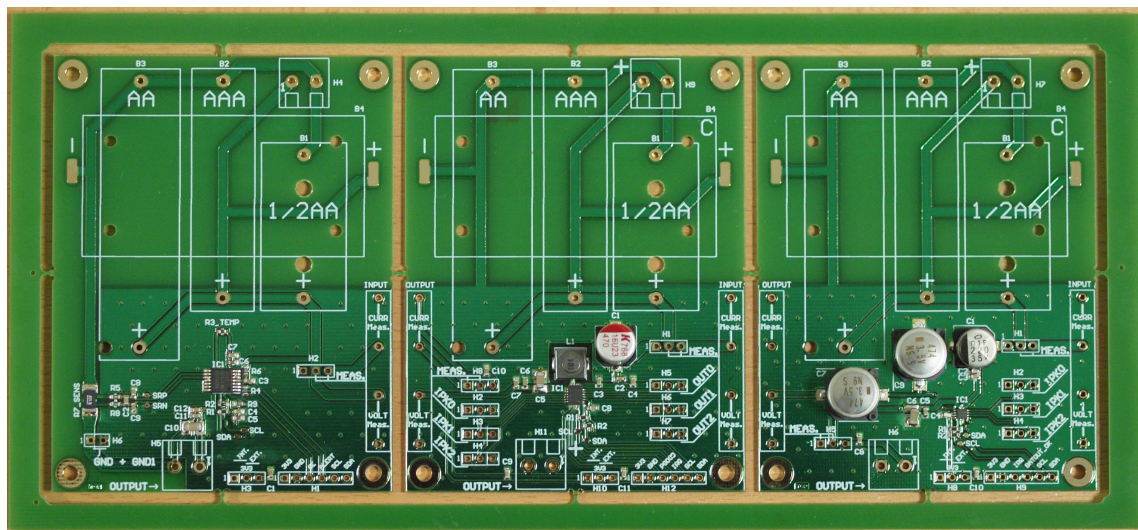
Obr. 12.4: 3D vizualizace všech DPS.



U pouzder na baterie dochází k překrývání 3D modelů. Je to ovšem záměr z důvodu co největšího možného obsazení typů pouzder na baterie různých velikostí od ½AA, AAA, AA a C. Při realizaci měření by tedy v případě nutnosti změny článku bylo možné DPS osadit příslušným držákem pro daný typ a rozměr pouzdra baterie. Výroba DPS byla zadána firmě Printed s.r.o.. Vyrobené DPS v panelu jsou zachyceny na Obr. 12.6.



Obr. 12.5: 3D vizualizace návrhu panelizace DPS pro výrobu.



Obr. 12.6: Vyrobené a částečně osazené DPS v panelu.

## 12.2 Softwarová obsluha

Pro vybrané integrované obvody (dále jen IO) bylo zapotřebí vytvořit obslužné knihovny, které zajišťují správnou inicializaci samotného IO, včetně čtení a zápisu z/do příslušných registrových bank. Protože samotný IO nelze přímo připojit např. přes sběrnici USB, bylo nutné využít jednoduchého mikrokontroléru (dále  $\mu\text{C}$ ) od společnosti Atmel, dnes vlastněnou Microchip Technology, a vytvořeného programu, který by zajišťoval komunikaci s IO přes sběrnici I<sup>2</sup>C a vyčtená data poté přeposílal přes sběrnici USB do sériového portu přímo do počítače (*dataloggeru*). Pro vytvoření programu do  $\mu\text{C}$  bylo využito vývojového studia *Visual Studio Code* od společnosti Microsoft, kde byl naspán obslužný program v jazyce C/C++. V základu bylo využito obslužné knihovny pro sběrnici I<sup>2</sup>C. Dále byly pro IO (LTC3335 a LTC3337) vytvořeny obslužné třídní knihovny a v kombinaci se zmíněnou I<sup>2</sup>C knihovnou došlo k vytvoření funkčního programu. V třídních knihovnách jsou napsány metody umožňující snadné nastavení (zápis/čtení) z/do registrových bank a vyčtení aktuálních naměřených hodnot s jejich výpisem na sériový port.

Pro IO BQ35100 bylo využito evaluační karty EV2400 (fotografie v příloze na Obr. A.11), která zastává místo  $\mu\text{C}$ . K evaluační kartě je dostupný volně stažitelný software s názvem *Battery management studio* přímo od výrobce TI (snímky programu v příloze na Obr. A.12 až Obr. A.18). Tento software umí obsluhovat vícero druhů IO včetně právě BQ35100. Díky němu je možné vyčítat/zapisovat hodnoty z/do příslušných registrových bank. Je doplněn i funkcí zaznamenávání hodnot s uložením do souboru (*datalogger*).

Pro obsluhu celého měřicího řetězce a komunikaci se stolním multimetrem Keithley 2701 s multiplexorovou kartou 7702 a příslušným  $\mu\text{C}$  bylo dále nutné vytvořit záznamový (*logovací*) program. Ten má za úkol mimo řízení celého měřicího řetězce také sběr naměřených dat, jak ze sériového portu od  $\mu\text{C}$ , tak ze stolního multimetru. K napsání tohoto obslužného programu byl využit programovací jazyk Python a vývojové studio *PyCharm*. Vytvořený program umožňuje paralelní vyčítání hodnot ze sériového portu a multimetru s jejich záznamem a ukládáním do souboru včetně časového údaje a uplynulého času. S  $\mu\text{C}$  probíhala komunikace přes již zmíněný sériový port (COM port), tedy USB sběrnice a s multimetrem Keithley 2701 probíhala komunikace přes Ethernetový port. Pro komunikaci s multimetrem byla využito knihovny *py2700* a SCPI

příkazů. Tyto příkazy byly napsány tak, aby umožňovaly přepínání kanálů (vstupů) multiplexorové karty, na které bylo připojeno měření napětí, proudu a teploty. Veškeré naměřené hodnoty byly poté uloženy do souboru ve stanoveném formátu.

Pro vizualizaci naměřených dat byl vytvořen další program (script), který byl opět napsán v jazyce Python s využitím knihoven Pandas a Plotly. To usnadnilo práci s velkým objemem naměřených dat a jejich grafickou vizualizací. Vykreslené grafy jsou vidět v následujících přílohách.

### 12.2.1 Výpočet parametrů u jednotlivých IO

Následující podkapitola přibližuje samotný princip výpočtu a měření proteklé energie, resp. kapacity, pro jednotlivé integrované obvody. U každého obvodu je uvedený vztah, jak výpočet probíhá a na jakých parametrech je závislý.

- **LTC3335**

U obvodu LTC3335 je využíván princip tzv. *Coulomb counting*, popsáný v kapitole 9.1. Pro správné měření je nutné nakonfigurovat tzv. *prescaler* neboli předděličku. Její výpočet je založen na rovnici:

$$M = \log_2 \left( \frac{q_{LSB} \cdot 255}{Q_{BAT}} \right), \quad (12.2)$$

kde  $q_{LSB}$  značí tabelizovanou hodnotu uvedenou na str. 4 v datasheetu [71] v jednotkách mAh a  $Q_{BAT}$  je jmenovitá kapacita baterie v Ah. Dále je nutné vypočítat hodnotu LSB bitu pomocí rovnice:

$$q_{LSB_M} = \frac{q_{LSB}}{2^M}, \quad (12.3)$$

kde  $q_{LSB}$  značí opět tabelizovanou hodnotu a  $2^M$  je hodnota s mocnitelem  $M$  získaného z rovnice 12.2. Dále je nutná hodnota vyčteného příslušného registru (tabulka 5, strana 16 v datasheetu [71]), který je 50 bitový, ovšem lze vyčíst pouze 8 MSB bitů. Vyčtenou hodnotu náboje z registru poté vynásobíme s příslušnou hodnotou  $q_{LSB_M}$  a získáme tak hodnotu proteklé kapacity v jednotkách mAh. Tato hodnota představuje společně s registrem *ALERT* jediné dvě hodnoty, které lze vyčíst.

- **LTC3337**

Integrovaný obvod LTC3337 poskytuje oproti předešlému IO (LTC3335) více hodnot, které lze z registrů a jejich následným výpočtem vyčíst. Je zde využíván stejný princip měření jako v předchozím případě, tedy tzv. *Coulomb counting*. Pro správné měření je opět nutná správná konfigurace tzv. *prescaler*. Výpočet je založen na rovnici:

$$M = \log_2 \left( \frac{q_{LSB} \cdot 65535}{Q_{BAT}} \right), \quad (12.4)$$

kde  $q_{LSB}$  je tabulková hodnota uvedená na str. 3 v datasheetu [72] v jednotkách mAh a  $Q_{BAT}$  představuje jmenovitou kapacitu baterie v mAh. Dále je nutné opět vypočítat hodnotu LSB bitu pomocí rovnice:

$$q_{LSB_M} = \frac{q_{LSB}}{2^M}, \quad (12.5)$$

kde  $q_{LSB}$  značí opět tabulkovou hodnotu a  $2^M$  hodnotu s mocnitelem  $M$  vypočteného z předchozí rovnice 12.4. Opět je potřeba vyčíst 16 MSB bitů z příslušného registru (tabulka 4, strana 13 v datasheetu [72]). Vyčtenou hodnotu náboje z registru poté vynásobíme s příslušnou hodnotou  $q_{LSB_M}$  a získáme tak hodnotu proteklé kapacity v jednotkách  $\mu\text{Ah}$ .

Dále nám IO LTC3337 poskytuje hodnotu teploty na čipu. Tento výpočet je založen na rovnici:

$$DIE_{TEMP} = T_{LSB} \cdot COUNT_C - 41^\circ\text{C}, \quad (12.6)$$

kde  $T_{LSB}$  vyjadřuje hodnotu LSB bitu pro teplotu udávanou v tabulce na str. 4 v datasheetu [72] a  $COUNT_C$  je hodnota příslušného registru v tabulce 5 na str. 13 v datasheetu [72]. S využitím tohoto výpočtu získáme hodnotu teploty čipu.

Mezi další hodnoty, které tento IO poskytuje, je napětí na vstupech a výstupech. Tyto hodnoty získáme vyčtením příslušného registru (uvedených v tabulkách 6, 7, 8, 9 na str. 13 a 14 v datasheetu) a následným výpočtem podle rovnice:

$$V_{BAT(x)} = V_{LSB} \cdot COUNT_x, \quad (12.7)$$

kde  $V_{LSB}$  je hodnota LSB bitu pro napětí udávaná v tabulce na str. 4 v datasheetu [72] a  $COUNT_x$  hodnota příslušného registru. Výsledné napětí je poté v jednotkách mV.

Posledním parametrem zjistitelného na základně naměřených napětí je hodnota impedance v  $m\Omega$ . Samotný výpočet impedance je založen na rovnici:

$$Z = \frac{V_{BAT_{IN}(OFF)} - V_{BAT_{IN}(ON)}}{I_{PEAK}}, \quad (12.8)$$

kde  $V_{BAT_{IN}(OFF)}$  a  $V_{BAT_{IN}(ON)}$  značí hodnoty napětí na vstupu IO v mV a  $I_{PEAK}$  je tabulková hodnota maximální proudové špičky. Veškeré tyto hodnoty, včetně stavových registrů pro *ALERT* je možné z IO LTC3337 vyčítat.

- **BQ35100**

U obvodu BQ35100 je výčet hodnot poměrně jednodušší. Není zde nutné provádět přepočty pomocí rovnic a hodnot z registrů, jelikož samotný IO poskytuje v registrových bankách (tabulka 1 na str. 13 v datasheetu [73]) hodnoty již v potřebných jednotkách. Tedy hodnotu akumulované kapacity přímo v jednotkách  $\mu Ah$ , teplotu v K, kde přepočet na  $^{\circ}C$  je jednoduchý, a poté i hodnoty naměřeného napětí v mV a proudu naměřeného na externím bočníku v mA.

V módu *ACC*, popsáno v kapitole 10.3, pracuje na principu tzv. *Coulomb counting*, který je objasněn v kapitole 9.1. Dalším využitelným módem u tohoto IO je mód *EOS* pracující na principu korelace naměřeného vnitřního odporu, resp. napětí a proudu v korelaci s hodnotami nahraných v paměti IO již naměřených od výrobce. Jedná se o proprietární algoritmus, jehož princip funkce lze přirovnat k metodě uvedené v kapitole 9.2, přesněji *Model-based method*.

- **Teoretický výpočet**

Teoretický výpočet je zde uváděn jako druhá validační metoda měření oproti IO pro ověření naměřených hodnot. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 12.1. Výpočet byl rozdělen na dvě metody podle typu zátěže.

- **Konstantní zátěž**

Pro konstantní zátěž byla brána v potaz konstantní hodnota protékaného proudu 15 mA vynásobená časem délky měření. Tím byla získána hodnota

proteklé kapacity. Ve vizualizačním programu byl sice proveden výpočet pomocí integrálu, ovšem vzhledem k zanedbatelné odchylce byl výpočet zjednodušen pouze na uvedenou metodu.

#### – Proměnná zátěž

U proměnné zátěže byl výpočet celkové kapacity založený na Lichoběžníkové metodě (*Trapezoidal rule*) pro výpočet určitého integrálu. Ten byl implementován ve vizualizačním programu pomocí knihovny *Scipy* a došlo zde k jeho výpočtu v časovém intervalu 1 minuty. Výsledkem byla hodnota kapacity spotřebované platformou KETCube během 1 minuty. Poté došlo k přepočtu na hodiny a dosazení této hodnoty vynásobené časem měření. Následně tak mohlo dojít již k ověření teoretické a naměřené hodnoty kapacity pro proměnnou zátěž. Pro měření a výpočet byl využit KETCube-A.

Tab. 12.1: Vypočítané a naměřené hodnoty pro KETCube

	KETCube-A		KETCube-B	
Napájecí napětí [V]	3,0	3,6	3,0	3,6
Spotřebovaná kapacita [ $\mu$ Ah]	313,44	342,58	150,31	19,73

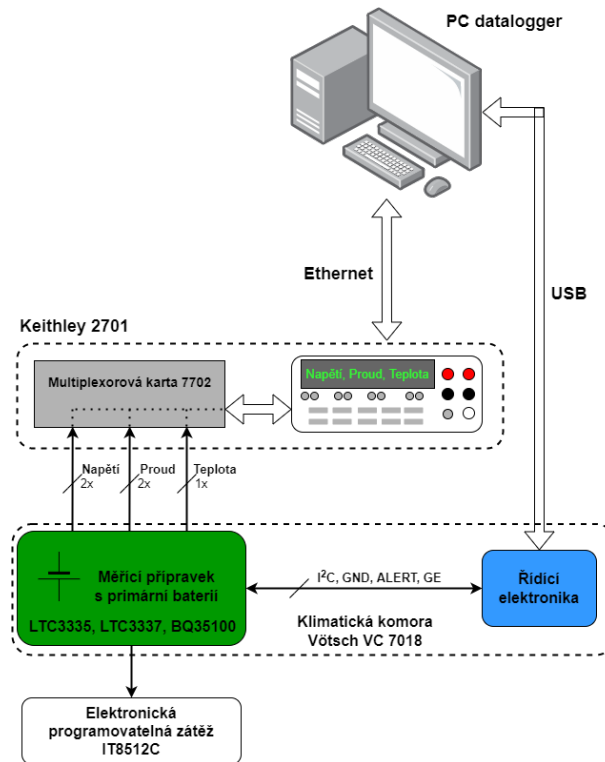
## 12.3 Návrh měřicího systému a měření

Návrh měřicího systému byl jednou z hlavních a důležitých částí samotné validace navržených desek s příslušnými IO, včetně primárních baterií. Bylo nutné vytvořit takový záznamový systém (datalogger), aby bylo možné zaznamenávat napětí, protékající proud a teplotu. Jako základní měřicí přístroj byl využit stolní multimeter Keithley 2701 (fotografie v příloze na Obr. A.6 a Obr. A.7) se 40 kanálovou multiplexorovou kartou (fotografie v příloze na Obr. A.8 a Obr. A.9) od stejné společnosti s identifikačním číslem 7702.

- **Měřicí řetězec pro konstantní zátěž**

Ilustrace měřicího systému pro konstantní zátěž je znázorněna na Obr. 12.7. Všechny tři navržené elektroniky byly vloženy společně s primární baterií a řídicí elektronikou do klimatické komory Vötsch VC 7018. V komoře byla nastavena teplota na konstantní hodnotu 25 °C a relativní vlhkost 40 % RH. Dále zde byla využita elektronická programovatelná zátěž IT8512C (v příloze na Obr. A.10),

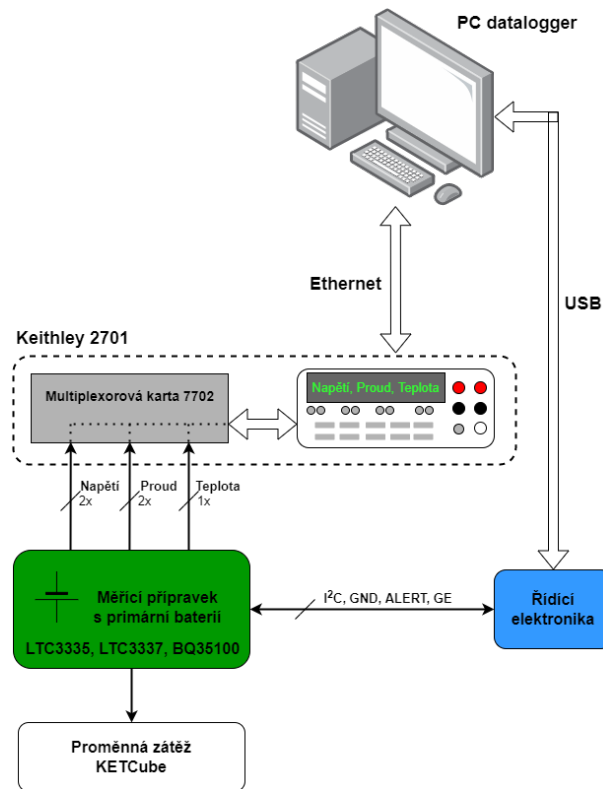
kteřá zatěžovala vždy jeden měřený obvod a odebírala proud 15 mA. Měření probíhalo postupně, kdy do komory byla vložena vždy jen jedna elektronika s primární baterií a proměřena. Důvodem bylo změřit a ověřit správnost měřicí funkce jednotlivých IO.



Obr. 12.7: Diagram zapojení měření v klimatické komoře Vötsch VC 7018 s elektronickou programovatelnou zátěží IT8512C

- **Měřicí řetězec pro proměnou zátěž**

Ilustrace měřicího řetězce s proměnou zátěží v podobě KETCube je znázorněna na Obr. 12.8. Měření probíhalo při proměnných podmínkách v místnosti. Místo elektronické programovatelné zátěže zde bylo využito platformy KETCube, která zde sloužila jako umělá zátěž. V platformě KETCube byl obsažen základní firmware periodicky odesílající data. U tohoto měření šlo zejména o validaci a funkčnost IO při proměnné zátěži. Průběhy naměřených proudů KETCube využitého pro měření, jsou zobrazeny v příloze na Obr. A.20 a Obr. A.21.



Obr. 12.8: Diagram zapojení měření s proměnou zátěží v podobě KETCube

## 12.4 Naměřené hodnoty

V této části jsou zahrnuty veškeré zaznamenané naměřené hodnoty. Tyto hodnoty byly porovnány oproti multimetru Keithley 2701 a teoreticky vypočítaným hodnotám z vizualizačního programu.

### 12.4.1 LTC3335

Prvním měřeným byl IO LTC3335, který jak už bylo v předchozích kapitolách avizováno, je IO s integrovaným DC/DC měničem a *Coulomb counterem*.

- **Konstantní zátěž 15 mA**

Při měření s konstantní zátěží byla vypočítána teoretická hodnota 775,69 mAh a samotná naměřená hodnota IO LTC3335 dosahovala 752,43 mAh. Pokud dojde k započítání chyby měření tohoto obvodu, tedy  $\pm 5\%$  ( $\pm 37,62$  mAh), je výsledná hodnota využití kapacity v normě s přesností měření obvodu. Zaznamenaná délka měření byla 51,77 hodiny. Porovnání kapacit je uvedeno v Tab.



12.2. IO LTC3335 tedy s konstantní zátěží 15 mA měřil adekvátně a i výsledky jsou v rámci teoretických a naměřených hodnot správné.

Vizualizace naměřených hodnot je uvedena v příloze: pro napětí Obr. A.24, proud Obr. A.25, teplota Obr. A.26 a využitou kapacitu Obr. A.27.

Tab. 12.2: Vypočítané a naměřené hodnoty pro LTC3335

	Datasheet	Teoretická	Naměřená
Kapacita [mAh]	600	775,69	752,43
Čas [h]	40	51,77	

- **Proměnná zátěž - KETCube**

Při měření proměnné zátěže pomocí IO LTC3335 vyšla naměřená využitá kapacita 744,52 mAh. Pokud ji porovnáme s teoretickými hodnotami vycházejících z Tab. 12.3, tak hodnota *Teoretická 1* vznikla z hodnoty 342,58  $\mu\text{Ah}$  proteklých za 1 minutu násobené celkovým časem a *Teoretická 2* z hodnoty 313,44  $\mu\text{Ah}$  opět násobené celkovým časem. Průměrná hodnota je následně aritmetickým průměrem obou teoretických hodnot. Při pohledu na naměřené hodnoty v této tabulce 12.3 vyšla naměřená hodnota kapacity o přibližně 120 mAh větší než *Teoretická 1*. Jelikož hodnota vyšla větší, je možné predikovat výpadek baterie a výsledek měření hodnotíme pozitivně. Délka měření byla 30,42 hodiny. Veškeré vizualizace jsou uvedeny v příloze: pro napětí Obr. A.28, proud Obr. A.29, teplota Obr. A.30 a akumulovaná kapacita Obr. A.31.

Tab. 12.3: Vypočítané a naměřené hodnoty pro LTC3335

	Datasheet	Teoretická 1	Teoretická 2	Průměr 1 a 2	Naměřená
Kapacita [mAh]	600	622,48	569,54	596	796,48
Čas [h]	40	30,42			

## 12.4.2 LTC3337

Druhý měřeným obvodem byl LTC3337. Obvod disponuje stejně jako předchozí přesným *Coulomb counterem* a výstupem doplněným o superkondenzátory.

- **Konstantní zátěž 15 mA**

Hodnoty teoretické a naměřené využití kapacity z baterie při konstantní zátěži 15 mA u tohoto IO vyšly s rozdílem přibližně 6 mAh, což je opravdu zanedbatelný

rozdíl a jedná se tedy o velmi přesné měření. Délka měření vyšla 53,08 hodiny. U tohoto obvodu je možné vidět i částečnou závislost naměřené impedance, která má v konečné fázi vybíjení stoupající trend. Obvod poskytuje i hodnotu teploty. Ta se plně shodovala s nastavenou a udržovanou teplotou v klimatické komoře. Veškerá vizualizace k tomuto měření je uvedena v příloze: pro napětí Obr. A.32, proud Obr. A.33, teplota Obr. A.34, využitá kapacita Obr. A.35 a naměřená impedance Obr. A.36.

Tab. 12.4: Vypočítané a naměřené hodnoty pro LTC3337

	Datasheet	Teoretická	Naměřená
Kapacita [mAh]	600	796,17	802,89
Čas [h]	40	53,08	

- **Proměnná zátěž - KETCube**

Při měření proměnné zátěže pomocí IO LTC3337 vyšla využitá energie z baterie celkově nižší. Naměřená hodnota byla 845 mAh, což oproti *Teoretické 1* je přibližně o 100 mAh méně. Při pohledu na hodnotu *Teoretická 2* by hodnota byla schodnější. Délka měření vyšla 45,67 hodiny. Opět se jedná o vcelku dobrý výsledek měření v kombinaci s touto primární baterií a výstupními superkondenzátory. Vizualizace naměřených hodnot je uvedena v příloze: pro napětí Obr. A.37, proud Obr. A.38, teplota Obr. A.39, využití kapacity Obr. A.40 a naměřená impedance Obr. A.41.

Tab. 12.5: Vypočítané a naměřené hodnoty pro LTC3337

	Datasheet	Teoretická 1	Teoretická 2	Průměr 1 a 2	Naměřená
Kapacita [mAh]	600	938,75	858,91	898,83	845
Čas [h]	40	45,67			

### 12.4.3 BQ35100

Posledním měřeným obvodem byl IO BQ35100, který využívá externího proudového bočníku a v módu ACC opět principu *Coulomb counteru*.

- **Konstantní zátěž 15 mA**

Hodnoty pro porovnání teoretické a naměřené využití kapacity z baterie vyšly u IO BQ35100 s obdobnou hodnotou výsledku. Rozdíl teoretické a naměřené

kapacity je přibližně 12 mAh. Tento rozdíl je opět v 5 % hranici přesnosti měření. Délka měření vyšla 56,24 hodiny. Dále IO poskytoval hodnotu naměřené teploty. Ta se v celém průběhu měření lišila přibližně o 1 °C. Veškerá vizualizace měření je uvedena v: pro napětí Obr. A.42, proud Obr. A.43, teplota Obr. A.44 a využitá kapacita Obr. A.45.

Tab. 12.6: Vypočítané a naměřené hodnoty pro BQ35100

	Datasheet	Teoretická	Naměřená
Kapacita [mAh]	600	843,53	855,81
Čas [h]	40	56,24	

- **Proměnná zátěž - KETCube**

U měření proměnné zátěže pomocí IO BQ35100 vyšla hodnota naměřené kapacity 744,52 mAh, což je přibližně o 60 mAh méně než hodnota vypočítané kapacity *Teoretická 1*. Při pohledu na hodnotu *Teoretická 2* je tato hodnota naměřené kapacity schodná. Jedná se opět o dobrý výsledek a funkčnost tohoto IO. Délka měření byla 39,73 hodiny. Naměřené hodnoty jsou vizuálně zobrazeny v příloze: pro napětí Obr. A.46, proud Obr. A.47, teplota Obr. A.48 a využitá kapacita Obr. A.49.

Tab. 12.7: Vypočítané a naměřené hodnoty pro BQ35100

	Datasheet	Teoretická 1	Teoretická 2	Průměr 1 a 2	Naměřená
Kapacita [mAh]	600	816,55	747,11	781,83	744,52
Čas [h]	40	39,73			

#### 12.4.4 Celkové porovnání

V této podkapitole je uvedené porovnání všech měřených IO jak pro konstantní zátěž 15 mA, tak pro proměnnou zátěž.

- **Konstantní zátěž 15 mA**

Při měření konstantní zátěže se všemi IO vyšly obdobné výsledky teoretických a naměřených hodnot využití kapacity baterie. Porovnání shrnuje tabulka Tab. 12.8, z které je možné vyvodit, že nejnižší kapacitu (752,43 mAh) naměřil obvod LTC3335 i s nejkratším časem (51,77 hodiny). Vliv na výslednou hodnotu může

být zapříčiněn vlivem DC/DC měniče, jeho účinností a vlastní spotřebou. Obvod ale i tak vykazuje velmi dobrý finální výsledek v tomto měření.

Druhým testovaným IO byl LTC3337. Jedná se o novější IO mající poměrně nižší vlastní spotřebu než předchozí IO. Hodnoty teoretické a naměřené kapacity se rozcházejí přibližně o 6 mAh. Jedná se o velice dobrý výsledek samotného měřicího obvodu a o vcelku přesnou shodu teoretické a naměřené hodnoty. Celková délka měření byla v tomto případě 53,08 hodiny.

Posledním testovaným IO byl BQ35100. Tento obvod disponuje oproti dvou předchozím IO jinou topologií zapojení. Byl zde zaznamenán nejdelší čas měření, konkrétně 56,24 hodiny. Naměřená hodnota kapacity 855,81 mAh se oproti teoretické lišila o 12 mAh. Jedná se opět o velice dobrý výsledek v přesnosti měření tímto IO. Jiným druhem provedeného měření u tohoto IO bylo testování módu EOS. Ten bohužel i po dvou pokusech měření nebyl schopný podat adekvátní hodnoty zbývajících kapacity v baterii, resp. její procentuální hodnotu (vizualizace výsledků v příloze Obr. A.50 až A.53).

Tab. 12.8: Porovnání hodnot jednotlivých IO

IO	LTC3335		LTC3337		BQ35100	
	Teoretická	Naměřená	Teoretická	Naměřená	Teoretická	Naměřená
Kapacita [mAh]	775,69	752,43	796,17	802,89	843,53	855,81
Čas [h]	51,77		53,08		56,24	

U všech měřených IO byly vykazovány dobré výsledky naměřené proteklé energie, včetně ostatních parametrů. Jsou tedy vhodné pro vlastní aplikaci do IoT zařízení s velice validními a přesnými výsledky.

#### • Proměnná zátěž - KETCube

U měření proměnné zátěže vybranými IO vyšly poměrně různé výsledky oproti teoreticky vypočítaným hodnotám využití kapacity z baterie. Porovnání těchto hodnot je uvedeno v Tab. 12.9. Nejvyšší kapacitu a nejdelší čas měření byl zaznamenán u IO LTC3337, jehož naměřená kapacita má hodnotu 845 mAh. Tato hodnota se oproti teoretickým hodnotám lišila a to až o 100 mAh. Tato chyba může být způsobena možnými výpadky zátěže (KETCube), jelikož při pohledu do grafu naměřeného napětí, na Obr. A.37, je možné pozorovat určité výpadky v

poklesech napětí. Teoretické hodnoty jsou počítány spojitě v čase se stanovenou hodnotou proteklé energie v Tab. 12.1, kde však není s těmito výpadky počítáno. Kladný vliv u tohoto IO zde mají výstupní superkondenzátory, které zde prodloužily délky vybíjení a zamezily degradaci primární baterie z důvodu pokrytí špičkových proudů.

Druhou nejvyšší naměřenou kapacitu v hodnotě 796,48 mAh zaznamenal IO LTC3335. Tato hodnota energie je oproti teoretickým hodnotám přibližně o 100 mAh vyšší. To může být způsobeno velkým vytížením DC/DC měniče integrovaného v tomto IO a jeho vlastní spotřebou. U tohoto obvodu se naopak vyskytl nejkratší čas vybíjení článku a to 30,42 hodiny, což by mohlo potvrzovat vlastní spotřebu IO.

Posledním měřeným byl IO BQ35100. Tento obvod naměřil kapacitu 744,52 mAh. Ta se opět od teoretické hodnoty lišila přibližně o 80 mAh. Zde se může jednat o stejný problém jako u IO LTC3337, jelikož vlastní spotřeba u tohoto obvodu je opět zanedbatelná. Napětí s naměřenými výpadky je vidět opět v grafu Obr. A.46. Čas měření vyšel 39,73 hodiny, což představuje druhou nejvyšší hodnotu v tomto druhu měření.

Tab. 12.9: Porovnání hodnot pro jednotlivé IO

IO	LTC3335			LTC3337			BQ35100		
	Teoretická 1	Teoretická 2	Naměřená	Teoretická 1	Teoretická 2	Naměřená	Teoretická 1	Teoretická 2	Naměřená
Měření	622,48	596,52	796,48	938,75	858,91	845	816,55	747,11	744,52
Kapacita [mAh]									
Čas [h]			<b>30,42</b>			<b>45,67</b>			<b>39,73</b>

Všechny IO si s proměnou zátěží poradily celkově dobře. Zejména IO LTC3337 a BQ35100 jsou pravděpodobně vhodnějšími kandidáty do aplikace s proměnou zátěží než IO LTC3335, který byl omezen vlastním DC/DC měničem. Jednou z výhod IO LTC3337 je jeho připravenost na proměnou zátěž díky výstupním superkondenzátorům, které by bylo v případě aplikace vhodné doplnit i k IO BQ35100, kde by bylo ale nutné provést patřičné úpravy v návrhu.

## 13 Závěr

Problematika monitorování stavu baterií představuje v dnešní době velice diskutované téma. Důvodem je jejich přítomnost prakticky ve všech druzích zařízení, od jednoduchých miniaturních, přes mobilní telefony, až po automobilismus a velkokapacitní skladování elektrické energie. Jedním z největších zástupců elektrochemických článků jsou primární baterie. Díky vývoji nových druhů chemických složení a technologií se staly znovu se rozšiřujícím segmentem. Oproti nabíjecím akumulátorům nabízejí nesporný počet výhod, mezi které lze zařadit především jejich bezpečnost, velkou výdrž a dlouholetou skladovatelnost. Kvůli takto rozsáhlé problematice je nutné se zabývat i vývojem monitorovacích a predikčních metod včetně vhodných algoritmů. Veškeré metody je poté potřeba implementovat do hardwarových řešení a aplikací.

V úvodu práce byla rozebrána problematika Internetu věcí a IoT sítí, včetně vlastností a souvisejících prvků. Byla zde popsána podstata samotných IoT zařízení, potřebných komunikačních bran a bezdrátové komunikace. Kapitola byla dále doplněna o podmnožiny samotného IoT využívaných v průmyslu jako je IIoT nebo lékařství IoMT. Na tuto úvodní problematiku IoT navázal podrobnější rozbor a porovnání nejpoužívanějších LPWAN sítí, mezi které lze zařadit právě technologie LoRa se sítí LoRaWAN, Sigfox a NB-IoT. U všech zmíněných sítí byla popsána technologie komunikace, používané modulace, frekvence, QoS, rozšiřitelnosti, ceny a dalších klíčových parametrů ovlivňující jejich praktické nasazení.

Další tématem, které byla obsaženo v teoretické části práce byl technický popis nejpoužívanějších drátových komunikačních sběrnic. Tyto sběrnice jsou hardwarovým spojovacím prvkem ve všech elektronických systémech a zařízeních. Popis byl započat samotným vysvětlením sériové a paralelní komunikace, následovaný rozbohem nejpoužívanějších drátových sběrnic. Mezi tyto sběrnice řadíme především známé I<sup>2</sup>C a SPI. Ty jsou doplněny i o nově vznikající perspektivní komunikační sběrnici I<sup>3</sup>C. Ta je využitelná nejen v mobilních a IoT zařízeních, ale i ve vysokorychlostní komunikaci mezi mikroprocesory, a přináší s sebou několik nových a vylepšených stávajících funkcí zmíněných sběrnic.

Navazující partie se zabývala popisem *open source* vývojové a prototypovací katederní platformy KETCube, která zde byla uvedena jako jedno ze zajímavých zařízení

spadajících do IoT. Její popis se týkal jak hardwarové výbavy, tak softwarové obsluhy.

Pozornost byla dále věnována *Energy harvesting*. Tato partie obsahovala popis metod přeměny a získávání energie z okolí zařízení. Díky této technologii je možné vyrobit elektrickou energii z různých druhů vstupních zdrojů, od klasické přeměny světla, tepla a pohybu, až po využití například biomechanických změn v rostlinách.

Součástí teoretické části práce byl i popis zejména primárních baterií, jejich rozčlenění a funkcí. Největší pozornost zde byla věnována bateriím na bázi Lithium-thionylchloridu, a to díky jejímu využití v praktické části práce, ale také z důvodů nesporných výhod tohoto elektrochemického článku. Informace o bateriích byly dále doplněny o metody SOH a EOS, kde došlo k podrobnějšímu rozboru využívaných metod a principů pro zjišťování stavu zbývající energie v bateriích. Byl zde proveden popis od klasicky využívaných, až po experimentální metody využívající neuronové sítě.

Teoretická část byla zakončena řešením vybraných integrovaných obvodů použitelných právě pro primární baterie, zejména tedy pro baterii Li-SOCl<sub>2</sub>. Ta byla navíc vybrána jako zástupce pro řešení z důvodu plánovaného využití této baterie s platformou KETCube.

Praktická část byla věnována realizaci řešení. Tato realizace je rozčleněna do několika klíčových částí. Nejprve došlo k návrhu a výrobě tří různých desek plošných spojů pro tři rozdílné řešované integrované obvody. Tím se povedlo vytvořit dobré platformy pro jejich počáteční testování včetně měření primárních baterií. Bylo využito primární baterie s chemickým složením na bázi Lithium-thionylchloridu (Li-SOCl<sub>2</sub>), zmiňované v teoretické části, s označením EVE ER14250. Pro více informací k této primární baterii byl i kontaktován výrobce, bohužel bez odezvy. Pro správnou funkci a vyčítání měřených veličin z vybraných integrovaných obvodů bylo nutné napsat a vytvořit obslužný program včetně příslušných ovládacích knihoven v jazyce C/C++. Pro obvod LTC3335 bylo využito jako předlohy evaluační desky od výrobce. U integrovaného obvodu LTC3337 došlo k čistě novému návrhu jak desky plošného spoje, tak i softwarové obsluhy včetně knihovny. Pro obvod BQ35100 byla navržena deska plošných spojů opět s inspirací v evaluační kartě výrobce. U tohoto integrovaného obvodu bylo dále využito karty EV2400. Pro ověření správnosti měření integrovaných obvodů byl navržen a realizován měřící systém založený na multimetru Keithley 2701 s multiplexorovou kartou 7702. Bylo tak možné provádět vícekanálové měření napětí,

proudu a teploty, tedy tří důležitých parametrů pro ověření správného návrhu a funkce integrovaných obvodů. Tento měřicí systém byl doplněn vytvořeným obslužným programem v jazyce Python s využitím příslušných knihoven. Program zde sloužil jako terminál a datalogger pro veškerá naměřená data, jak z integrovaných obvodů, tak z multimetru. V návaznosti na to byl vytvořen i vlastní vizualizační program pro veškerá naměřená data. Ten byl opět realizován pomocí jazyka Python s využitím knihoven Pandas a Plotly.

Samotné měření integrovaných obvodů probíhalo při dvou typech zátěže. Prvním typem byla konstantní zátěž s hodnotou 15 mA zajištěna elektronickou programovatelnou zátěží IT8512C. Toto měření probíhalo při kontrolovaných klimatických podmínkách v klimakomoře Vötsch VC 7018. Naměřené hodnoty využití energie z baterie u jednotlivých integrovaných obvodu byly shodné s teoretickými hodnotami, a jednalo se tedy o velice příznivé výsledky. Druhý typ měření byl uskutečněn s pomocí proměnné zátěže v podobě platformy KETCube, kdy vše probíhalo za klasických podmínek v místnosti. Správné výsledky v tomto měření podaly zejména integrované obvody LTC3337 a BQ35100.

Závěrem lze říci, že veškeré návrhy, desky plošných spojů a softwaru se povedlo úspěšně realizovat i ověřit. Z měření vyplývá, že všechny tři integrované obvody jsou vhodné pro měření v oblasti konstantní zátěže. Pro oblast proměnné zátěže, kde bylo nutné reagovat na skokové změny odebíraného proudu, jsou vhodnější zejména dva z výše zmíněných integrovaných obvodů, konkrétně LTC3337 a BQ35100, které si v této problematice vedly o poznání lépe. U BQ35100 je nutné poznamenat, že se z části nepodařilo ověřit proprietární režim EOS, který nebyl schopen doposud podat relevantní informace o stavu baterie. Všechny tři integrované obvody jsou ale v závěrečném hodnocení schopny poskytovat validní naměřená data a je tak na uživateli, který integrovaný obvod použije do svého zapojení a jak využije jeho přednosti.



# Literatura

- [1] AERIS. *What is IoT? Defining the Internet of Things (IoT)* [online]. aeris.com, 2022. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z: <https://www.aeris.com/in/what-is-iot/>.
- [2] ORACLE. *What is IoT?* [online]. oracle.com, 2022. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z: <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>.
- [3] KOŘOUSKOVÁ, B. *Internet věcí (IoT): definice, příklady využití, produkty* [online]. <https://www.rascasone.com/cs>, 2021/11/17. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z: <https://www.rascasone.com/cs/blog/iot-internet-veci-definice-produkty-historie>.
- [4] *The Internet of Things* [online]. infocube.cz/, 2017. [cit. 2021/04/13]. Dostupné z: [https://infocube.cz/wp-content/uploads/2017/11/IoT\\_obr.png](https://infocube.cz/wp-content/uploads/2017/11/IoT_obr.png).
- [5] BIGELOW, S. J. *Ultimate IoT implementation guide for businesses* [online]. <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/>, 2021/04/14. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/Ultimate-IoT-implementation-guide-for-businesses>.
- [6] HCLTECH. *What is an IoT device?* [online]. <https://www.hcltech.com/>. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z: <https://www.hcltech.com/technology-qa/what-is-an-iot-device>.
- [7] ARM. *What Are IoT Devices?* [online]. <https://www.arm.com/>. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z: <https://www.arm.com/glossary/iot-devices>.
- [8] SOFTWARE, O. A. *What is an IoT Gateway?* [online]. <https://openautomationsoftware.com/>. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z: <https://openautomationsoftware.com/open-automation-systems-blog/what-is-an-iot-gateway/>.
- [9] JENA, S. *Internet of Things (IoT) Gateways* [online]. <https://www.geeksforgeeks.org/>, 2020/06/25. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/internet-of-things-iot-gateways/>.
- [10] SOURI, ALIREZA AND HUSSIEN, ASEEL AND HOSEYNINEZHAD, MAHDI AND NOROUZI, MONIRE. *A systematic review of IoT communication strategies for an efficient smart*

- environment* [online]. 2019/08/29. [cit. 2022/03/20]. Dostupné z:  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ett.3736>.
- [11] W.Z. KHAN AND M.H. REHMAN AND H.M. ZANGOTI AND M.K. AFZAL AND N. ARMI AND K. SALAH. *Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges* [online]. 2020/06/25. [cit. 2022/02/20]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790618329550>.
- [12] VISHNU, S. AND RAMSON, S.R. JINO AND JEGAN, R. *Internet of Medical Things (IoMT) - An overview* [online]. IEEE, 2020. [cit. 2022/03/20]. Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9075733>.
- [13] ORDR.NET. *What is IoMT?* [online]. <https://www.geeksforgeeks.org/>.  
[cit. 2022/03/20]. Dostupné z: <https://ordr.net/article/what-is-iot/>.
- [14] RAVI TEJA. *Wireless Communication: Introduction, Types and Applications* [online]. 03.04.2021. [cit. 21.11.2021]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/wireless-communication-introduction-types-applications/>.
- [15] TECHOPEDIA. *Wireless Communications* [online]. 05.12.2016. [cit. 21.11.2021].  
Dostupné z:  
<https://www.techopedia.com/definition/10062/wireless-communications>.
- [16] EVERYTHING RF. *GPS Frequency Bands* [online]. 2021. Dostupné z:  
<https://www.everythingrf.com/community/gps-frequency-bands>.
- [17] EVERYTHING RF. *GLONASS Frequency Bands* [online]. 2017. Dostupné z:  
<https://www.everythingrf.com/community/glonass-frequency-bands>.
- [18] EVERYTHING RF. *BeiDou Frequency Bands* [online]. 2018. Dostupné z:  
<https://www.everythingrf.com/community/beidou-frequency-bands>.
- [19] EVERYTHING RF. *Galileo Frequency Bands* [online]. 2017. Dostupné z:  
<https://www.everythingrf.com/community/galileo-frequency-bands>.
- [20] ANDREA, GOLDSMITH. *Wireless Communications* [online]. 2017. [cit. 21.03.2022].  
Dostupné z: <http://14.99.188.242:8080/jspui/bitstream/123456789/7194/1/W%20C%20by%20Andrea%20Goldsmith.pdf>.

- [21] DEVALAL SHILPA, KARTHIKEYAN A. *LoRa Technology - An Overview* [online]. 2018. [cit. 23.4.2022]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8474715>.
- [22] GKOTSIPOULOS PANAGIOTIS, ZORBAS DIMITRIOS, DOULIGERIS CHRISTOS. *Performance Determinants in LoRa Networks: A Literature Review* [online]. 2021. [cit. 26.4.2022]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9463416>.
- [23] THE THINGS NETWORK. *LoRaWAN - Frequency Plans by Country* [online]. [cit. 23.4.2022]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>.
- [24] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/07.2021-8 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. [online]. [cit. 23.4.2022]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/vo-r10-072021-8.pdf>.
- [25] MEKKI KAIS, BAJIC EDDY, CHAXEL FREDERIC, MEYER FERNAND. *Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT* [online]. 2018. [cit. 26.4.2022]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8480255>.
- [26] THE THINGS NETWORK. *LoRaWAN airtime calculator* [online]. [cit. 23.4.2022]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator>.
- [27] SEMTECH. *LoRa® Platform for IoT: LoRa Core™, LoRa Edge™ and LoRa 2.4GHz* [online]. [cit. 23.4.2022]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf>.
- [28] JAN SEDLÁK, LUPA.CZ. *Sít internetu věcí Sigfox míří do bankrotu, v Česku má provoz fungovat i nadále* [online]. [cit. 23.4.2022]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/aktuality/sit-internetu-veci-sigfox-miri-do-bankrotu-v-cesku-ma-provoz-fungovat-i-nadale/>.
- [29] VEJLGAARD BENNY, LAURIDSEN MADS, NGUYEN HUAN, KOVACS ISTVAN Z., MOGENSEN PREBEN, SORENSEN MADS. *Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT* [online]. 2017. [cit. 25.4.2022]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8108666>.

- [30] NAIR KISHOR KRISHNAN, ABU-MAHFOUZ ADNAN M., LEFOPHANE SAMUEL. *Analysis of the Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) Technology* [online]. 2019. [cit. 26.4.2022]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8480255>.
- [31] VODAFONE. *NB-IoT: Co všechno stojí za sítí, která dělá z obyčejné budovy chytrou* [online]. [cit. 23.4.2022]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/business-blog/internet-veci/nb-iot-co-vsechno-stoji-za-siti-ktera-dela-z-obyce/>.
- [32] ZIFF DAVIS. PCMAG DIGITAL GROUP. *bus* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/bus>.
- [33] TECHOPEDIA. *Bus* [online]. 30.9.2020. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/2162/bus>.
- [34] RATNA. *Parallel Communication – Evolution, Works, Characteristics, When to Use* [online]. [cit. 21.2.2022]. Dostupné z: <https://electricalfundablog.com/parallel-communication-characteristics/>.
- [35] SAHIL MISHRA. *Serial Communication – Protocols, Standards and Advantages* [online]. [cit. 21.2.2022]. Dostupné z: <https://electricalfundablog.com/serial-communication-protocols-standards/>.
- [36] NXP SEMICONDUCTORS N.V. *UM10204 I<sup>2</sup>C-bus specification and user manual* [online]. [cit. 25.2.2022]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
- [37] SAL AFZAL. *I<sup>2</sup>C Primer: What is I<sup>2</sup>C? (Part 1)* [online]. [cit. 25.2.2022]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/i2c-primer-what-is-i2c-part-1.html>.
- [38] WWW.I2C-BUS.ORG. *I<sup>2</sup>C – What’s That?* [online]. [cit. 25.2.2022]. Dostupné z: <https://www.i2c-bus.org/>.
- [39] MIPI ALLIANCE, INC. *MIPI I<sup>3</sup>C and I<sup>3</sup>C Basic* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <https://www.mipi.org/specifications/i3c-sensor-specification>.
- [40] EVISION SYSTEMS GMBH. *I<sup>2</sup>C vs I<sup>3</sup>C Protocol Analyzers: Differences and Similarities* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <https://evision-webshop.de/I2C-vs-I3C-Protocol-Analyzers-Differences-and-Similarities>.

- [41] PETER CLARKE. *MIPI opens up access to I3C specifikaci* [online]. [cit. 5.11.2021].  
Dostupné z:  
<https://www.eenewsanalog.com/news/mipi-opens-access-i3c-specification>.
- [42] PIYU DHAKER. *Introduction to SPI Interface* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z:  
<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>.
- [43] FPGA4FUN. *SPI 1 - What is SPI?* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z:  
<https://www.fpga4fun.com/SPI1.html>.
- [44] OPEN SOURCE HARDWARE ASSOCIATION. *A Resolution to Redefine SPI Signal Names* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z:  
<https://www.oshwa.org/a-resolution-to-redefine-spi-signal-names/>.
- [45] HAMÁČEK, J. B. J. C. J. F. P. K. A. KETCube – the Universal Prototyping IoT Platform. *IEEEExplore*. 2018, s. 93. doi: 10.1109/DSD.2018.00037. Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8491808>.
- [46] MURATA MANUFACTURING CO., LTD. *Sub-G Module Data Sheet* [online]. 2017. [cit. 16.10.2021]. Dostupné z:  
[https://wireless.murata.com/datasheet?/RFM/data/type\\_abz.pdf](https://wireless.murata.com/datasheet?/RFM/data/type_abz.pdf).
- [47] STMICROELECTRONICS. *Ultra-low-power 32-bit MCU Arm® based Cortex®-M0+, STM32L082KB, STM32L082KZ, STM32L082CZ* [online]. 2019. [cit. 16.10.2021].  
Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l082cz.pdf>.
- [48] SEMTECH. *Datasheet SX1276/77/78/79* [online]. 2019. [cit. 16.10.2021]. Dostupné z:  
[https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R00000010Ks/Bs97dmPXeatnbdoJNVMIDaKD1Qz8q1N\\_gxDcgqi7g2o](https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R00000010Ks/Bs97dmPXeatnbdoJNVMIDaKD1Qz8q1N_gxDcgqi7g2o).
- [49] SEMTECH. *Semtech SX1276* [online]. 2019. [cit. 16.10.2021]. Dostupné z:  
<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1276>.
- [50] MIKROELEKTRONIKA D.O.O. *mikroBUS™ standard specifications* [online]. 2015. [cit. 16.10.2021]. Dostupné z: <https://download.mikroe.com/documents/standards/mikrobus/mikrobus-standard-specification-v200.pdf>.

- [51] MIKROELEKTRONIKA D.O.O. *mikroBUS™ pinout standard specification* [online]. 2012. [cit. 16.10.2021]. Dostupné z: [https://www.mouser.com/pdfdocs/mikroElektronika\\_mikroBUS\\_specification.pdf](https://www.mouser.com/pdfdocs/mikroElektronika_mikroBUS_specification.pdf).
- [52] ADAMANT NAMIKI PRECISION JEWEL CO., LTD. *What is Energy Harvesting? What is Energy Harvesting Challenges?* [online]. [cit. 21.11.2021]. Dostupné z: [https://www.ad-na.com/magazine\\_en/archives/437](https://www.ad-na.com/magazine_en/archives/437).
- [53] FREDERIK DOSTAL, ANALOG DIALOGUE. *New Advances in Energy Harvesting Power Conversion* [online]. 30.10.2020. [cit. 21.11.2021]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/energy-harvesting-power-conversion.html>.
- [54] SANISLAV TEODORA, Z. S. F. S. C. M. G. D. *Energy Harvesting Techniques for Internet of Things (IoT)* [online]. 2021.
- [55] ČEZ, A. S. *Obnovitelné zdroje - Slunce* [online]. [cit. 05.04.2022]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelné-zdroje/slunce>.
- [56] KONSTANTOPOULOS CHRISTOS, M. N. B. A. K. E. *Converting a Plant to a Battery and Wireless Sensor with Scatter Radio and Ultra-Low Cost* [online]. 2016.
- [57] BEARD, K. W. *Handbook of batteries (3rd Ed.)*. McGraw-Hill Education., 2019. ISBN 9781260115925.
- [58] BATTEX, SPOL. S R.O. *Primární články a baterie - definice* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <http://www.battex.info/primarni-clanky-a-baterie/definice>.
- [59] BATTEX, SPOL. S R.O. *Primární články a baterie - rozdělení* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <http://www.battex.info/rozdeleni>.
- [60] BATTEX, SPOL. S R.O. *Primární články a baterie - Zinkové primární články* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <http://www.battex.info/primarni-clanky-a-baterie/zinkove-primarni-clanky>.
- [61] BATTEX, SPOL. S R.O. *Primární články a baterie - Lithiové primární články* [online]. [cit. 5.11.2021]. Dostupné z: <http://www.battex.info/primarni-clanky-a-baterie/lithiove-primarni-clanky>.
- [62] *Li-SOCl<sub>2</sub> batteries* [online]. Green Energy Battery Co., Ltd., 07/05-2020. [cit. 2021/04/17]. Dostupné z: <http://gebc-energy.com/en-US/Product-46.html>.

- [63] SOS ELECTRONIC S.R.O. *Zatím nepřekonaná výdrž – Li-SoCl<sub>2</sub> baterie od EVE* [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupné z: <https://www.soselectronic.cz/articles/eve-energy/zatim-neprekonana-vydrz-li-socl2-baterie-od-eve-2204>.
- [64] WEN-YEAU, C. *The state of charge estimating methods for battery: A review* [online]. Hindawi, 2013. Dostupné z: <https://downloads.hindawi.com/archive/2013/953792.pdf>.
- [65] MARTIN MURNANE. *A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries* [online]. Analog Devices. [cit. 5.4.2021]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/a-closer-look-at-state-of-charge-and-state-health-estimation-techniques.pdf>.
- [66] MATUŠ DANKO, M. T. P. D. J. A. *The state of charge estimating methods for battery: A review* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146519301905>.
- [67] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Relevance vector machine - Wikipedia The Free Encyclopedia* [online]. 2022. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Relevance\\_vector\\_machine&oldid=1072269200](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Relevance_vector_machine&oldid=1072269200).
- [68] NOURA NASSIM, J. S. B. L. *The state of charge estimating methods for battery: A review* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2032-6653/11/4/66>.
- [69] YAO LEI, T. A. Z. F. H. J. X. Y. F. Z. X. S. *A Review of Lithium-Ion Battery State of Health Estimation and Prediction Method* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2032-6653/12/3/113>.
- [70] RECOM POWER GMBH. *An Introduction to Buck, Boost, and Buck/Boost Converters* [online]. 30.10.2020. [cit. 21.11.2021]. Dostupné z: <https://recom-power.com/en/rec-n-an-introduction-to-buck,-boost,-and-buck!sboost-converters-131.html?0>.
- [71] LINEAR TECHNOLOGY - ANALOG DEVICES. *Nanopower Buck-Boost DC/DC with Integrated Coulomb Counter* [online]. 26.08.2015. [cit. 21.11.2021]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3335f.pdf>.

- [72] LINEAR TECHNOLOGY - ANALOG DEVICES. *Primary Battery SOH Monitor with Precision Coulomb Counter* [online]. 03.05.2021. [cit. 21.11.2021]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc3337.pdf>.
- [73] TEXAS INSTRUMENTS. *BQ35100 Lithium Primary Battery Fuel Gauge and End-Of-Service Monitor* [online]. 12.12.2020. [cit. 21.11.2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq35100.pdf?>
- [74] EVE. *ER14250* [online]. 2010. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1480397.pdf>.
- [75] SAFT. *LS14250* [online]. 2008. Dostupné z: [https://www.mouser.com/datasheet/2/101/LS%2014250\\_0308\\_revised\\_0908.772a07a6-be64-470c-9006-1941.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/101/LS%2014250_0308_revised_0908.772a07a6-be64-470c-9006-1941.pdf).
- [76] TADIRAN. *TL-4902* [online]. 2006. Dostupné z: <https://www.tadiranbat.com/assets/tl-4902.pdf>.
- [77] TADIRAN. *TL-5902/S* [online]. 2003. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/474/tadiran\\_tl5902-1214159.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/474/tadiran_tl5902-1214159.pdf).
- [78] XENO ENERGY. *XL-050F* [online]. 2020. Dostupné z: [http://www.xenoenergy.com/eng/file/Xeno%20Catalog%20XL-050F\\_E.pdf](http://www.xenoenergy.com/eng/file/Xeno%20Catalog%20XL-050F_E.pdf).
- [79] ULTRALIFE. *UHE-ER14250-H* [online]. 2013. Dostupné z: [https://www.ultralifeindia.com/wp-content/uploads/2020/01/TDS\\_UHE-ER14250.pdf](https://www.ultralifeindia.com/wp-content/uploads/2020/01/TDS_UHE-ER14250.pdf).
- [80] YE XUERONG, L. H. L. W. L. L. Z. G. S. Q. *Reliability Evaluation of Li/SOCl<sub>2</sub> Battery for Smart Electricity Meter Based on Remaining Capacity* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/reliability-evaluation-li-socl-sub-2-battery/docview/2513032106/se-2>.



# Seznam obrázků

2.1	Koncept IoT zařízení s primární baterií. . . . .	13
3.1	Koncept IoT (překresleno z [4]). . . . .	15
4.1	Grafické porovnání vybraných parametrů IoT sítí (překresleno z [29]). . . . .	27
5.1	Paralelní komunikace (překresleno z [34]). . . . .	29
5.2	Sériová komunikace s MSB první (překresleno z [35]). . . . .	29
5.3	Sběrnice $I^2C$ (překresleno z [37]). . . . .	31
5.4	Pozice $I^3C$ oproti ostatním sběrnicím (překresleno z [39]). . . . .	31
5.5	Sběrnice $I^3C$ (překresleno z [41]). . . . .	32
5.6	Sběrnice SPI, konfigurace s Chip select (překresleno z [42]). . . . .	33
5.7	Sběrnice SPI, konfigurace Daisy-Chain (překresleno z [42]). . . . .	34
6.1	Platforma KETCube (převzato z [45]). . . . .	35
6.2	Vnitřní diagram CMWX1ZZABZ-078 (překresleno z [46]). . . . .	36
6.3	mikroBUS platforma (převzato z [51]). . . . .	37
6.4	Schéma firmwaru KETCube (převzato z [45]). . . . .	38
7.1	Systém Energy Harvestingu (překresleno z [53]). . . . .	40
8.1	Rozdělení primárních článků (překresleno z [59]). . . . .	47
8.2	Rozdíl v konstrukci článku Li-SOCl <sub>2</sub> (převzato z [62]). . . . .	48
10.1	Blokové schéma LTC3335 (převzato z [71]). . . . .	61
10.2	Blokové schéma LTC3337 (převzato z [72]). . . . .	62
10.3	Blokové schéma BQ35100 (převzato z [73]). . . . .	64
11.1	Porovnání velikosti 1/2AA baterie Li-SOCl <sub>2</sub> (foto autora). . . . .	65
11.2	Vybíjecí charakteristika baterie ER14250 (překresleno z [74]). . . . .	66
12.1	Schéma zapojení s obvodem LTC3335 . . . . .	70
12.2	Schéma zapojení s obvodem LTC3337 . . . . .	71
12.3	Schéma zapojení s obvodem BQ35100 . . . . .	72
12.4	3D vizualizace všech DPS. . . . .	73

12.5	3D vizualizace návrhu panelizace DPS pro výrobu. . . . .	74
12.6	Vyrobené a částečně osazené DPS v panelu. . . . .	74
12.7	Diagram zapojení měření v klimatické komoře Vötsch VC 7018 s elektronickou programovatelnou zátěží IT8512C . . . . .	80
12.8	Diagram zapojení měření s proměnou zátěží v podobě KETCube . . . . .	81
A.1	Vnitřní rozložení baterie ER14250 ([80]). . . . .	102
A.2	Porovnání baterie 1/2AA oproti článku velikosti C, foto autora. . . . .	102
A.3	Vyrobená a osazená DPS s LTC3335. . . . .	104
A.4	Vyrobená a osazená DPS s LTC3337. . . . .	105
A.5	Vyrobená a osazená DPS s BQ35100. . . . .	106
A.6	Měřicí multimeter Keithley 2701 - přední strana. . . . .	107
A.7	Měřicí multimeter Keithley 2701 - zadní strana. . . . .	107
A.8	Multiplexorová karta 7702 - celkový pohled. . . . .	108
A.9	Multiplexorová karta 7702 - pohled dovnitř. . . . .	108
A.10	Elektronická programovatelná zátěž IT8512C. . . . .	109
A.11	Karta EV2400 od TI. . . . .	110
A.12	Aplikace Battery management studio od TI. . . . .	111
A.13	Aplikace Battery management studio od TI. . . . .	111
A.14	Aplikace Battery management studio od TI. . . . .	112
A.15	Aplikace Battery management studio od TI. . . . .	112
A.16	Aplikace Battery management studio od TI. . . . .	113
A.17	Aplikace Battery management studio od TI. . . . .	113
A.18	Aplikace Battery management studio od TI. . . . .	114
A.19	Naměřené průběhy obou KETCube - srovnání . . . . .	115
A.20	Naměřený průběh proudu KETCube-A při napětí 3 V, (1 min). . . . .	115
A.21	Naměřený průběh proudu KETCube-A při napětí 3,6 V, (1 min). . . . .	116
A.22	Naměřený průběh proudu KETCube-B při napětí 3 V, (1 min). . . . .	116
A.23	Naměřený průběh proudu KETCube-B při napětí 3,6 V, (1 min). . . . .	116
A.24	LTC3335 napětí. . . . .	117
A.25	LTC3335 proud. . . . .	117
A.26	LTC3335 teplota. . . . .	117
A.27	LTC3335 vyextrahovaná kapacita z baterie. . . . .	118

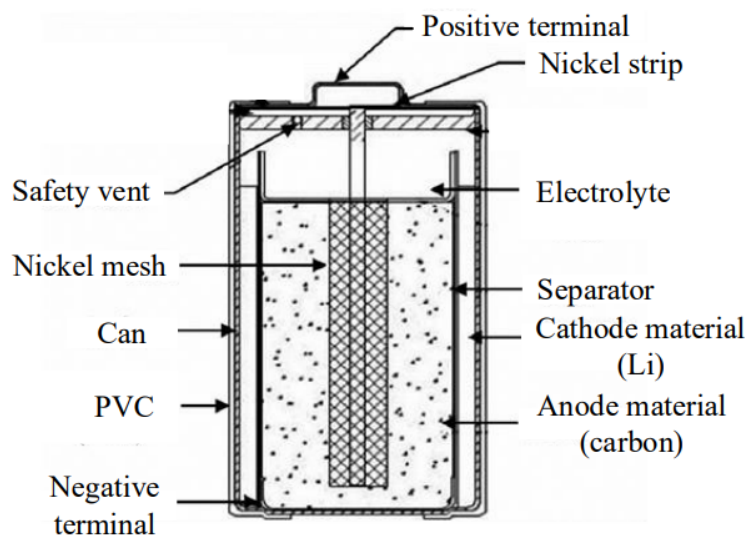
A.28 LTC3335 napětí. . . . .	118
A.29 LTC3335 proud. . . . .	119
A.30 LTC3335 teplota. . . . .	119
A.31 LTC3335 vyextrahovaná kapacita z baterie. . . . .	119
A.32 LTC3337 napětí. . . . .	120
A.33 LTC3337 proud. . . . .	120
A.34 LTC3337 teplota. . . . .	120
A.35 LTC3337 vyextrahovaná kapacita z baterie. . . . .	121
A.36 LTC3337 impedance. . . . .	121
A.37 LTC3337 napětí. . . . .	122
A.38 LTC3337 proud. . . . .	122
A.39 LTC3337 teplota. . . . .	122
A.40 LTC3337 vyextrahovaná kapacita z baterie. . . . .	123
A.41 LTC3337 impedance. . . . .	123
A.42 BQ35100 napětí - ACC. . . . .	124
A.43 BQ35100 proud - ACC. . . . .	124
A.44 BQ35100 teplota - ACC. . . . .	124
A.45 BQ35100 vyextrahovaná kapacita z baterie - ACC. . . . .	125
A.46 BQ35100 napětí - ACC. . . . .	125
A.47 BQ35100 proud - ACC. . . . .	126
A.48 BQ35100 teplota - ACC. . . . .	126
A.49 BQ35100 vyextrahovaná kapacita z baterie - ACC. . . . .	126
A.50 BQ35100 napětí - EOS. . . . .	127
A.51 BQ35100 proud - EOS. . . . .	127
A.52 BQ35100 teplota - EOS. . . . .	127
A.53 BQ35100 kapacita - EOS. . . . .	128

# Seznam tabulek

4.1	Porovnání sítí LoRa, Sigfox, NB-IoT [25, 30]. . . . .	24
11.1	Porovnání primárních baterií velikosti ½AA se jmenovitou kapacitou 1,2 Ah, převzato z [74–79] . . . . .	66
12.1	Vypočítané a naměřené hodnoty pro KETCube . . . . .	79
12.2	Vypočítané a naměřené hodnoty pro LTC3335 . . . . .	82
12.3	Vypočítané a naměřené hodnoty pro LTC3335 . . . . .	82
12.4	Vypočítané a naměřené hodnoty pro LTC3337 . . . . .	83
12.5	Vypočítané a naměřené hodnoty pro LTC3337 . . . . .	83
12.6	Vypočítané a naměřené hodnoty pro BQ35100 . . . . .	84
12.7	Vypočítané a naměřené hodnoty pro BQ35100 . . . . .	84
12.8	Porovnání hodnot jednotlivých IO . . . . .	85
12.9	Porovnání hodnot pro jednotlivé IO . . . . .	86
A.1	Porovnání různých druhů a metod <i>Energy harvesting</i> . . . . .	103

# A Přílohy

## Baterie ER14250



Obr. A.1: Vnitřní rozložení baterie ER14250 ([80]).

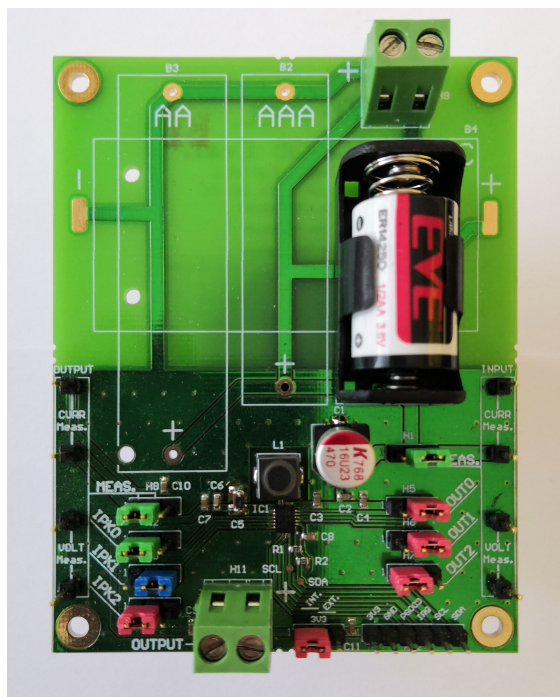


Obr. A.2: Porovnání baterie  $\frac{1}{2}$ AA oproti článku velikosti C, foto autora.

## Energy harvesting porovnání

Zdroj energie	Technologie	Hustota výkonu	Výhody	Nevýhody
Solární	Fotovoltaické články	10 - 100 mW/cm <sup>2</sup> (venku) <100 μW/cm <sup>2</sup> (uvnitř)	Vyšší výstupní napětí, nízké výrobní náklady, předvídatelnost	Nedostupné v noci, nekontrolovatelné
Rádiové vlny (RF)	Anténa	0,01 - 0,1 μW/cm <sup>2</sup> 1 - 10 mW/cm <sup>2</sup>	Dostupné kdekoli, kdykoliv předvídatelnost, kontrolovatelnost	Závislé na vzdálenosti, nízká hustota výkonu
Mechanické vibrace a tlak	Piezoelektrika	4 - 250 μW/cm <sup>3</sup>	Vysoká hustota výkonu, žádní externí zdroj, jednoduchost, kontrolovatelnost	Nestabilní výstup, nepředvídatelnost
	Elektromagnetika	300 - 800 μW/cm <sup>3</sup>	Vyšší výstupní proud, robustnost, nízká cena, kontrolovatelnost	Velikost a rozměry, nepředvídatelnost
	Elektrostatika	50- 100 μW/cm <sup>3</sup>	Vyšší výstupní napětí, vyšší výstupní hustota výkonu, nízká cena, kontrolovatelnost	Externí napájení, nepředvídatelnost
Lidské teplo	Piezoelektrika Pyroelektrika	<35 μW/cm <sup>3</sup>	Údržitelnost a spolehlivost, dostupnost, kontrolovatelnost	Nízká hustota výkonu, nepředvídatelnost
Biomechanické	Elektromagnetika Piezoelektrika Triboelektrika Elektrostatika	<4 μW/cm <sup>3</sup> <300 μW/cm <sup>3</sup>	Dostupnost, kontrolovatelnost	Nízká hustota výkonu, nepředvídatelnost
Bio (rostliny)	Kovové elektrody	Extrémně nízká hustota výkonu (nW)	Dostupnost, kontrolovatelnost	Extrémně nízký výkon, použitelné v nanoměřítku

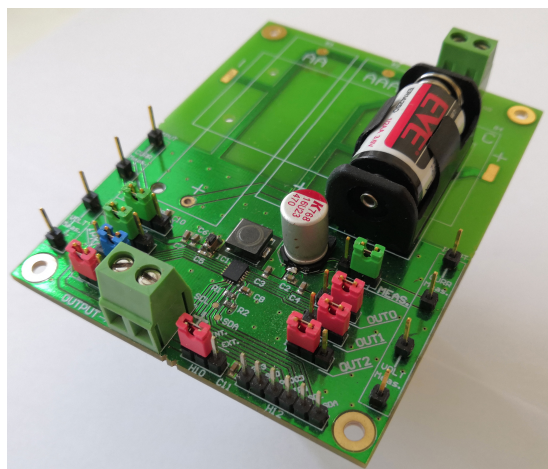
## Osazená DPS s LTC3335



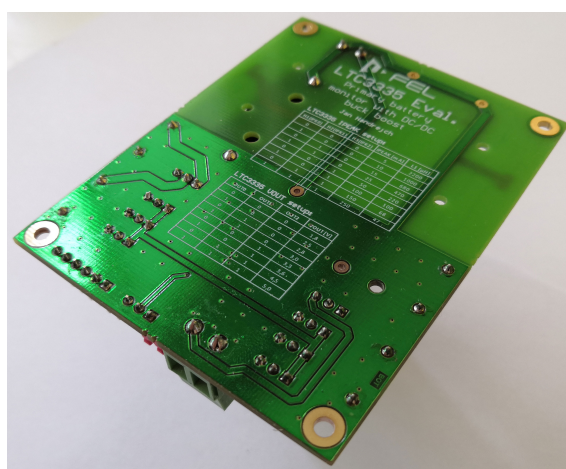
(a) Strana TOP



(b) Strana BOTTOM



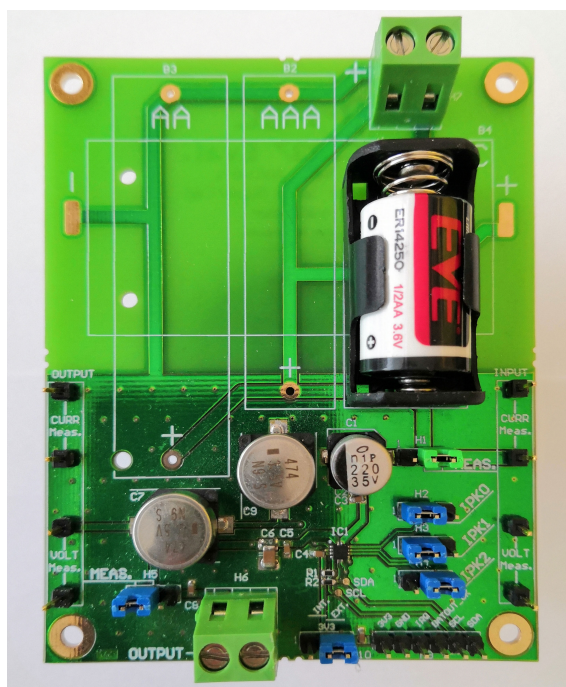
(c) Strana TOP



(d) Strana BOTTOM

Obr. A.3: Vyrobená a osazená DPS s LTC3335.

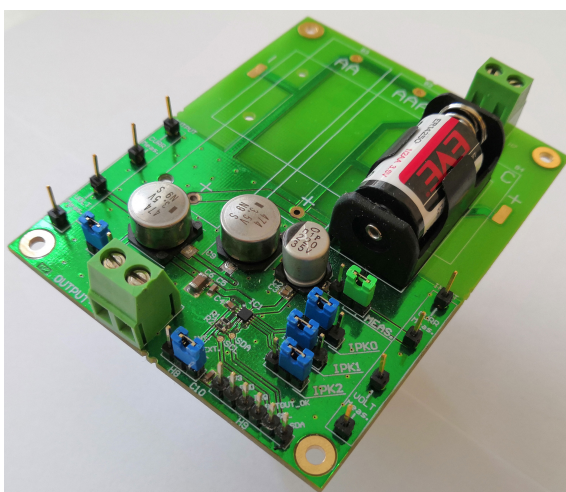
## Osazená DPS s LTC3337



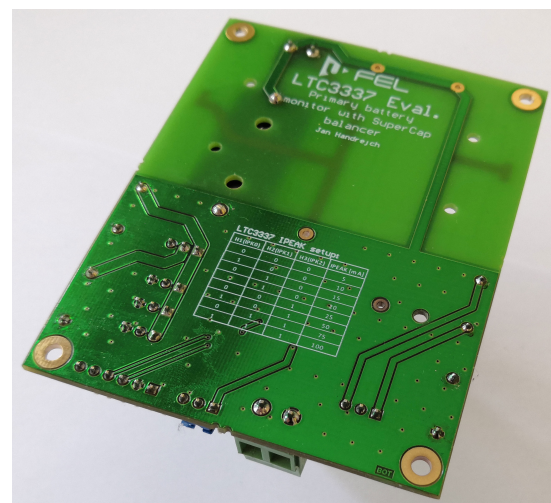
(a) Strana TOP



(b) Strana BOTTOM



(c) Strana TOP



(d) Strana BOTTOM

Obr. A.4: Vyrobená a osazená DPS s LTC3337.



## Osazená DPS s BQ35100



(a) Strana TOP



(b) Strana BOTTOM



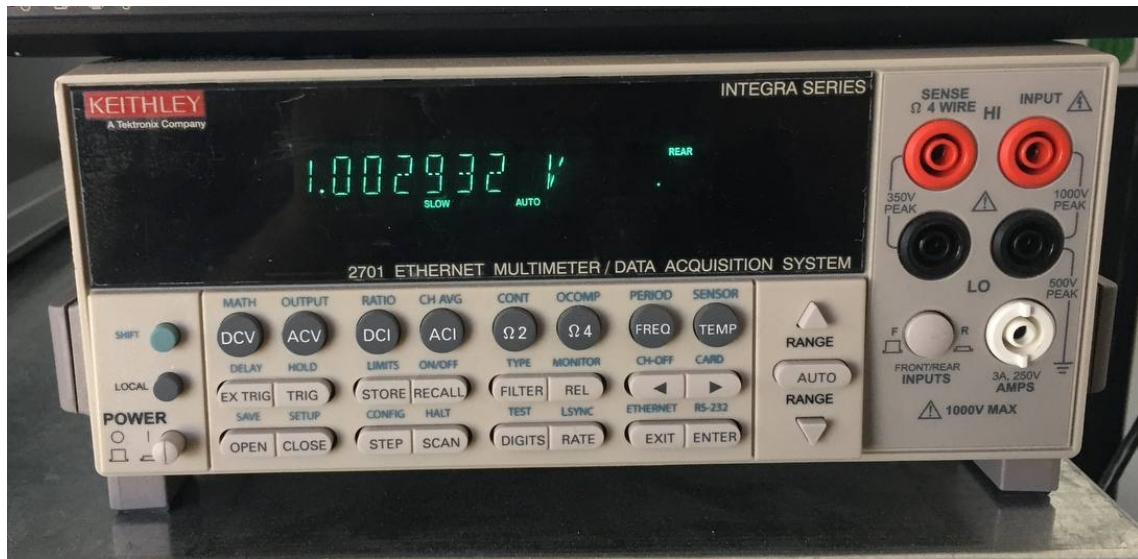
(c) Strana TOP



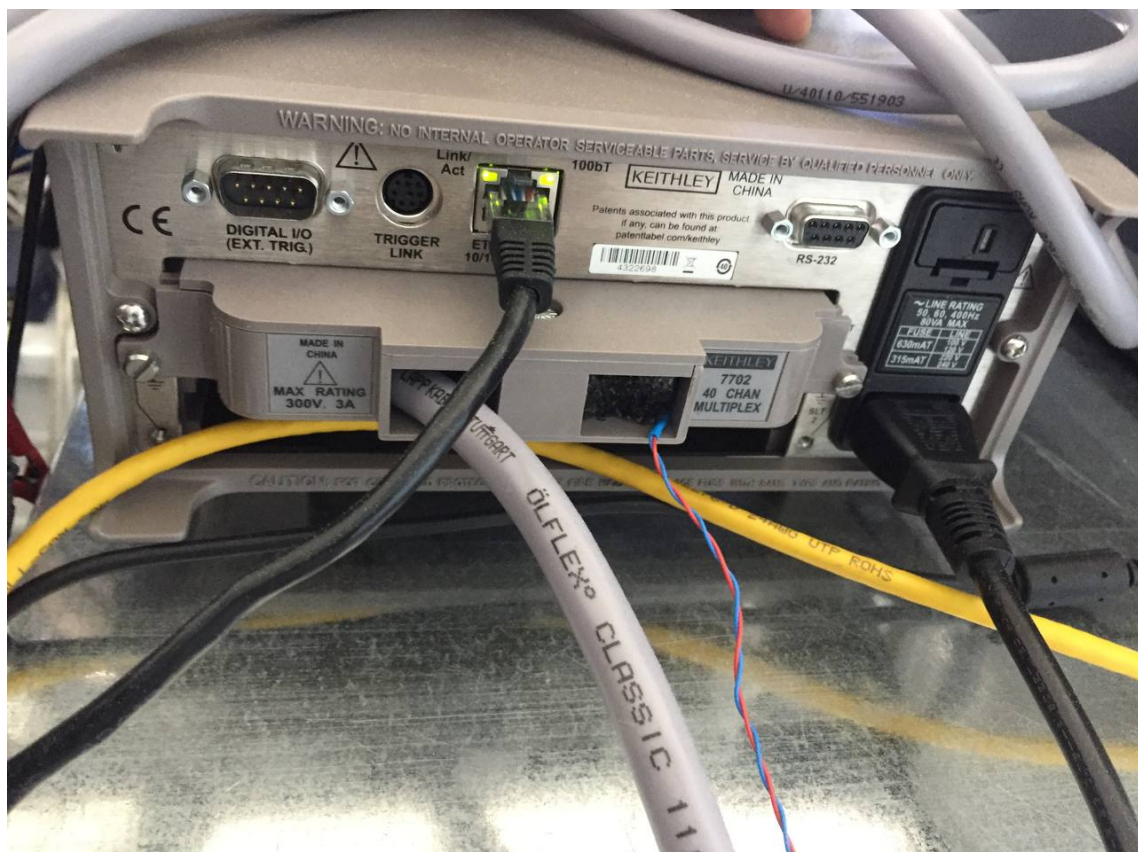
(d) Strana BOTTOM

Obr. A.5: Vyrobená a osazená DPS s BQ35100.

## Multimeter Keithley 2701

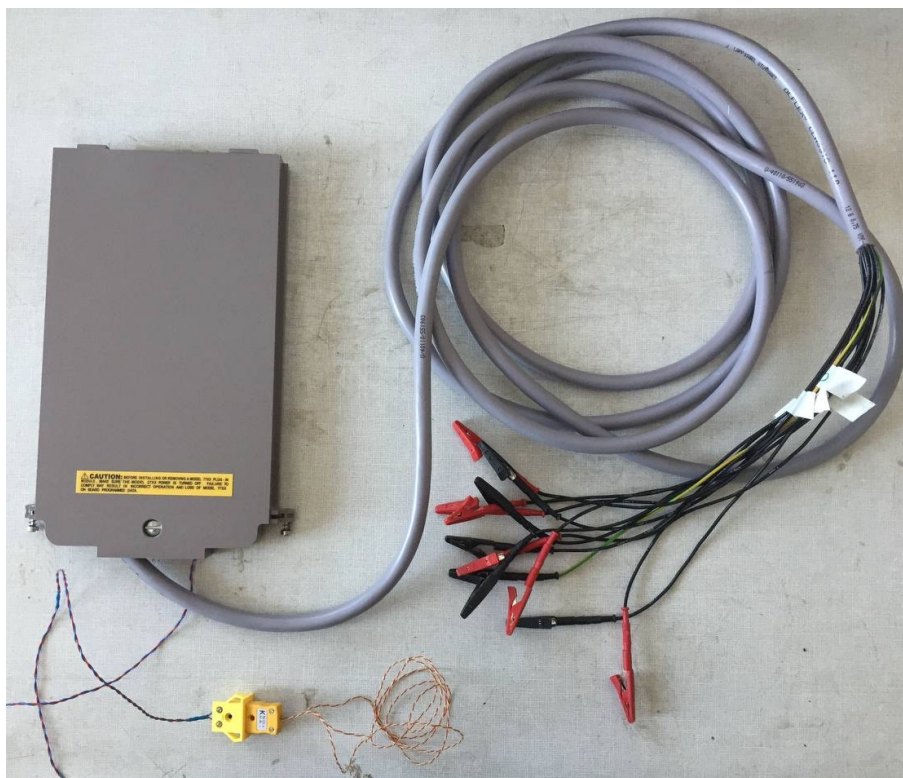


Obr. A.6: Měřicí multimeter Keithley 2701 - přední strana.

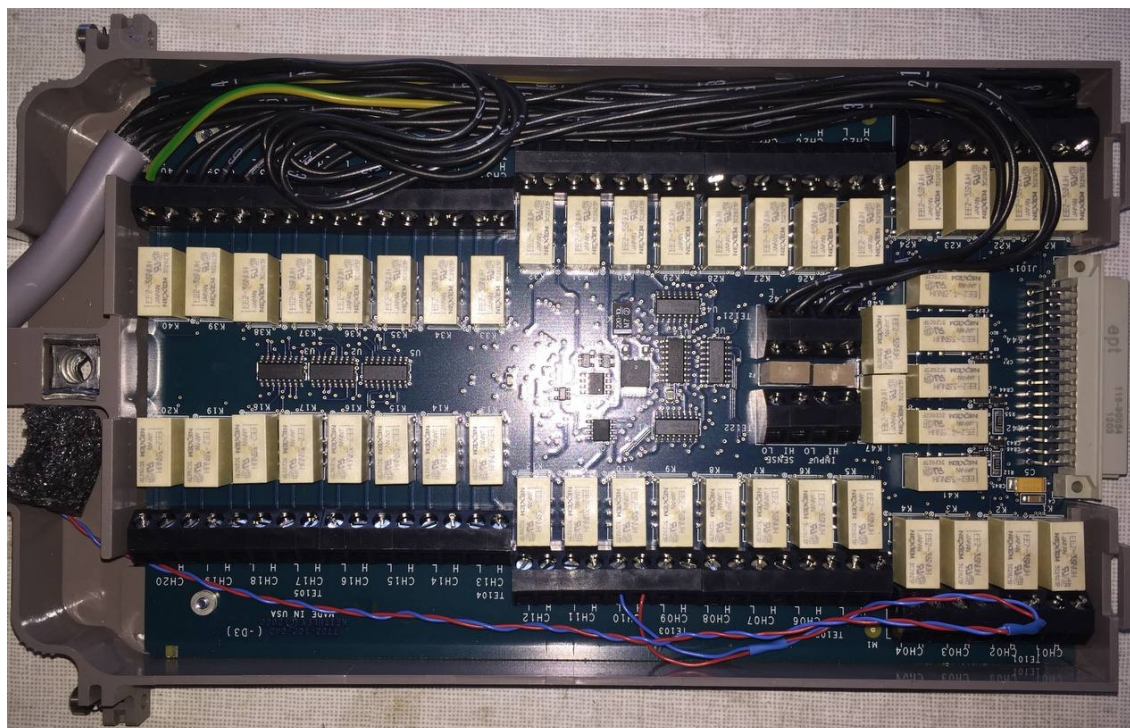


Obr. A.7: Měřicí multimeter Keithley 2701 - zadní strana.

## Multiplexorová karta 7702



Obr. A.8: Multiplexorová karta 7702 - celkový pohled.



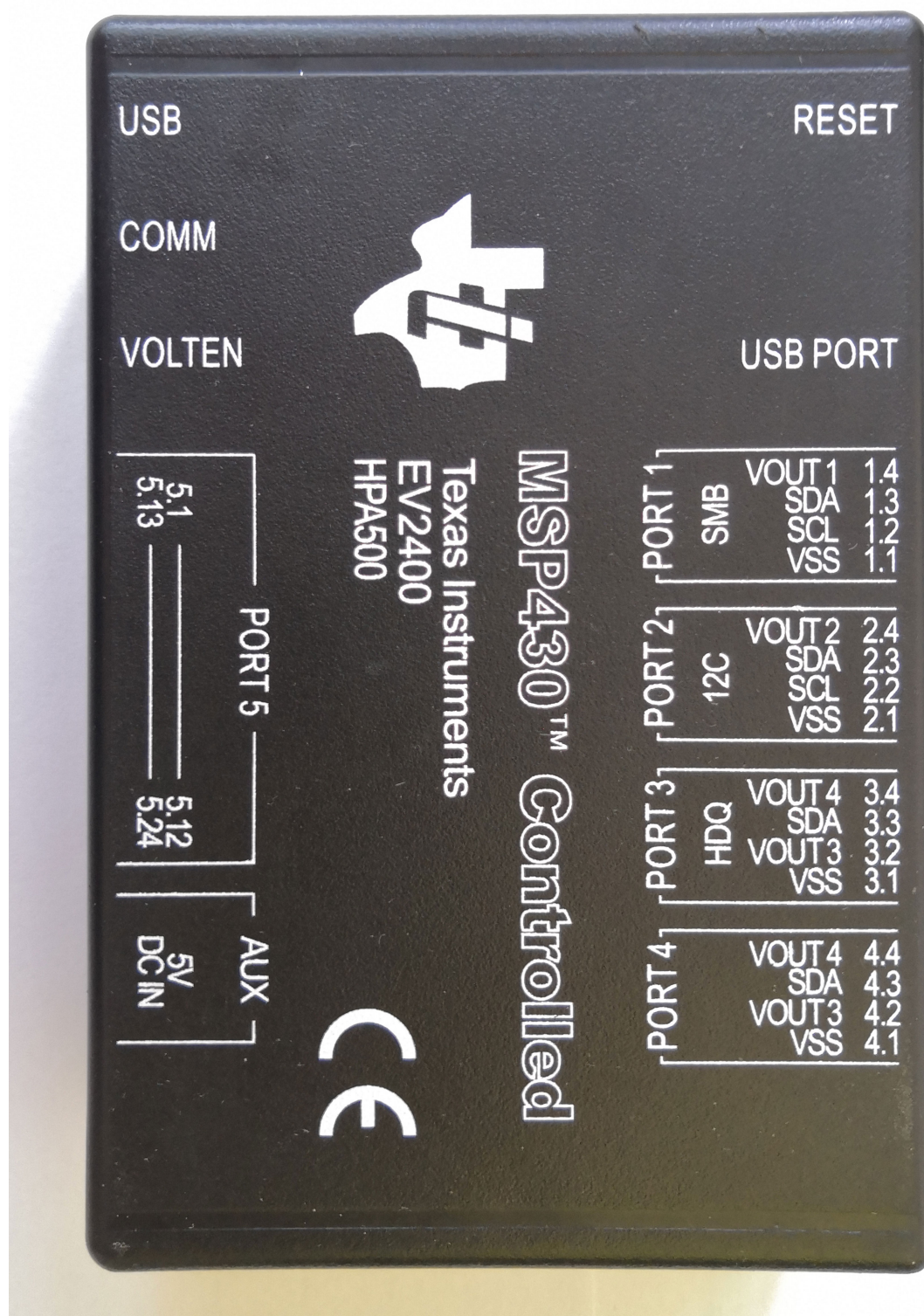
Obr. A.9: Multiplexorová karta 7702 - pohled dovnitř.

## Elektronická programovatelná zátěž IT8512C



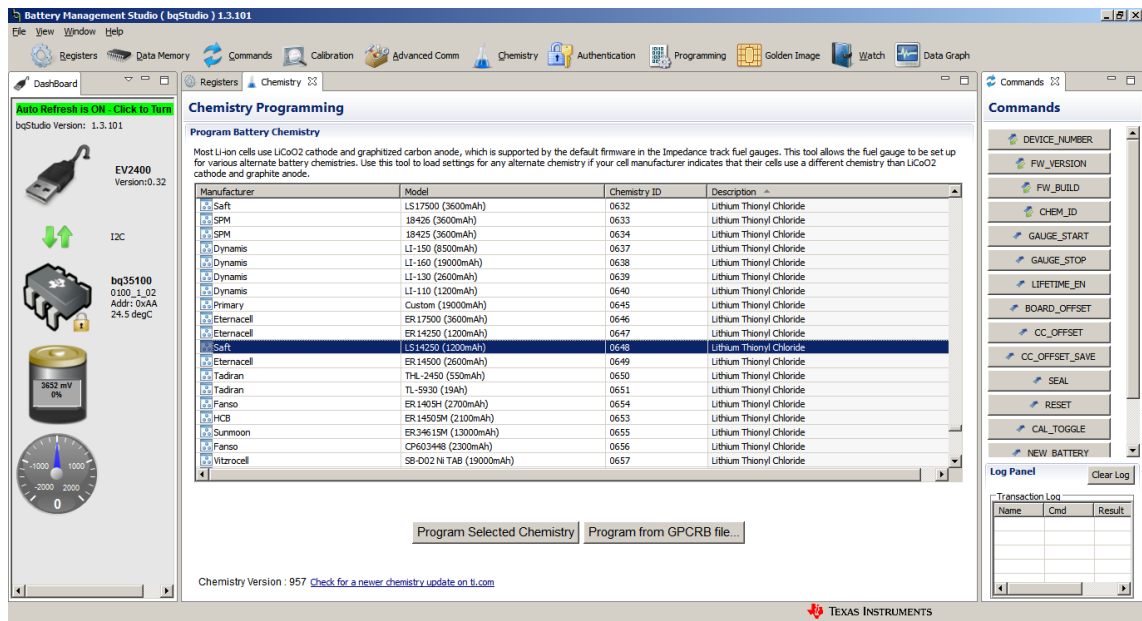
Obr. A.10: Elektronická programovatelná zátěž IT8512C.

## Evaluační karta EV2400 od TI

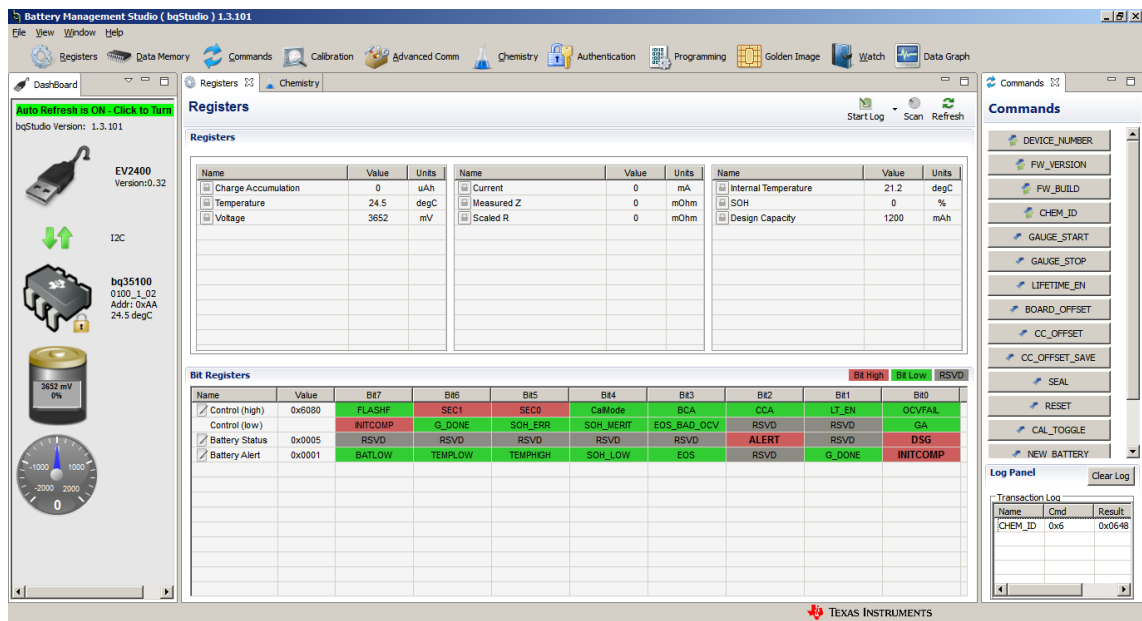


Obr. A.11: Karta EV2400 od TI.

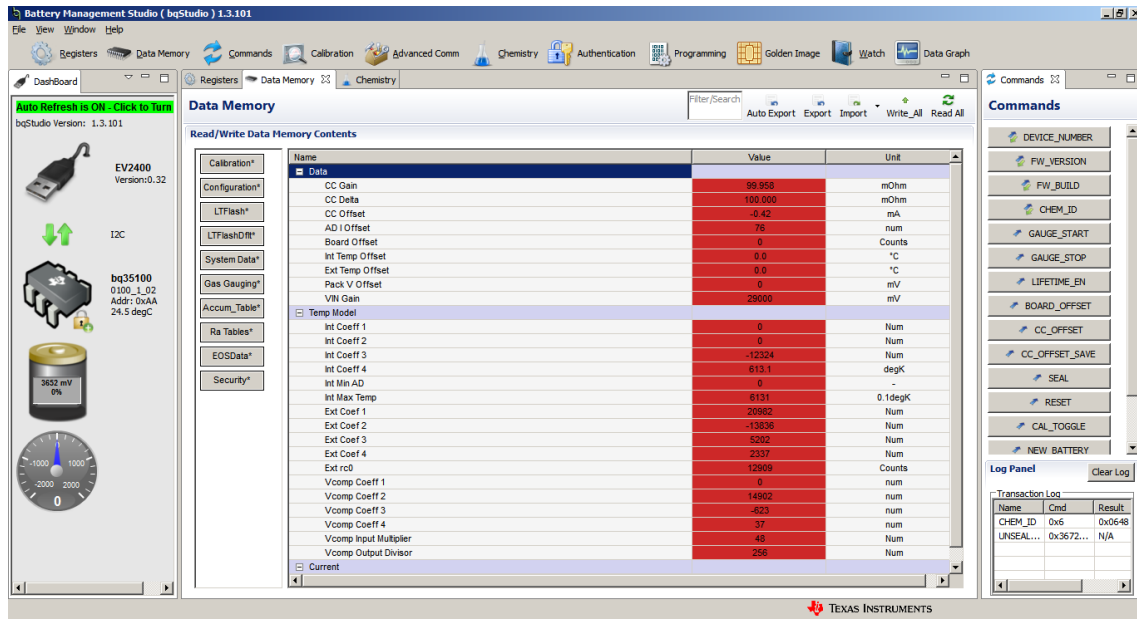
# Aplikace Battery management studio od TI



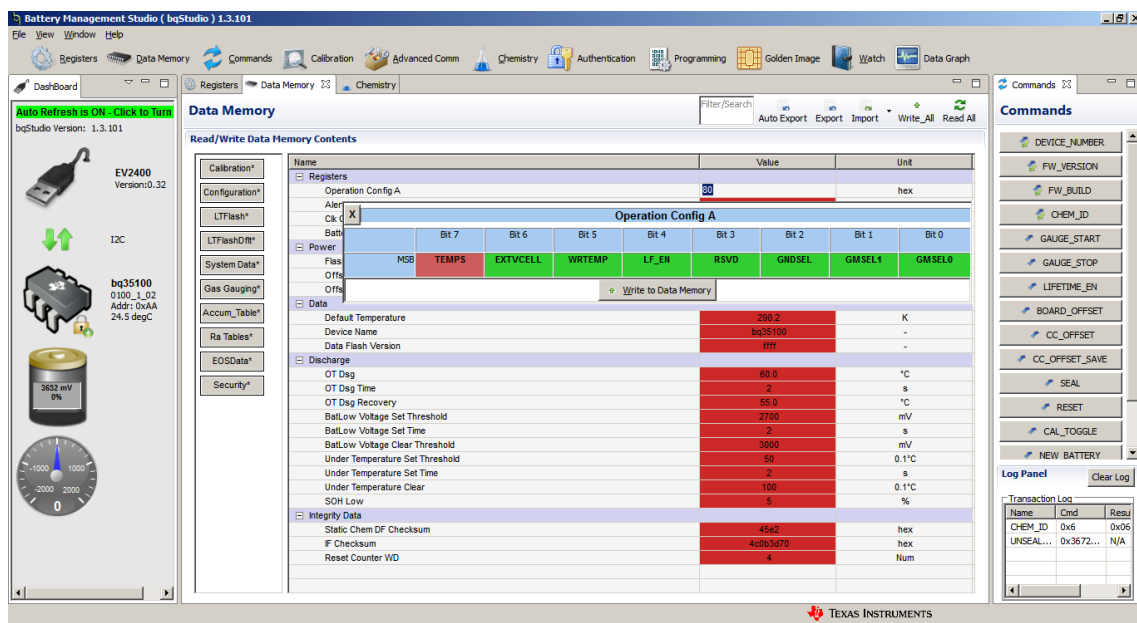
Obr. A.12: Aplikace Battery management studio od TI.



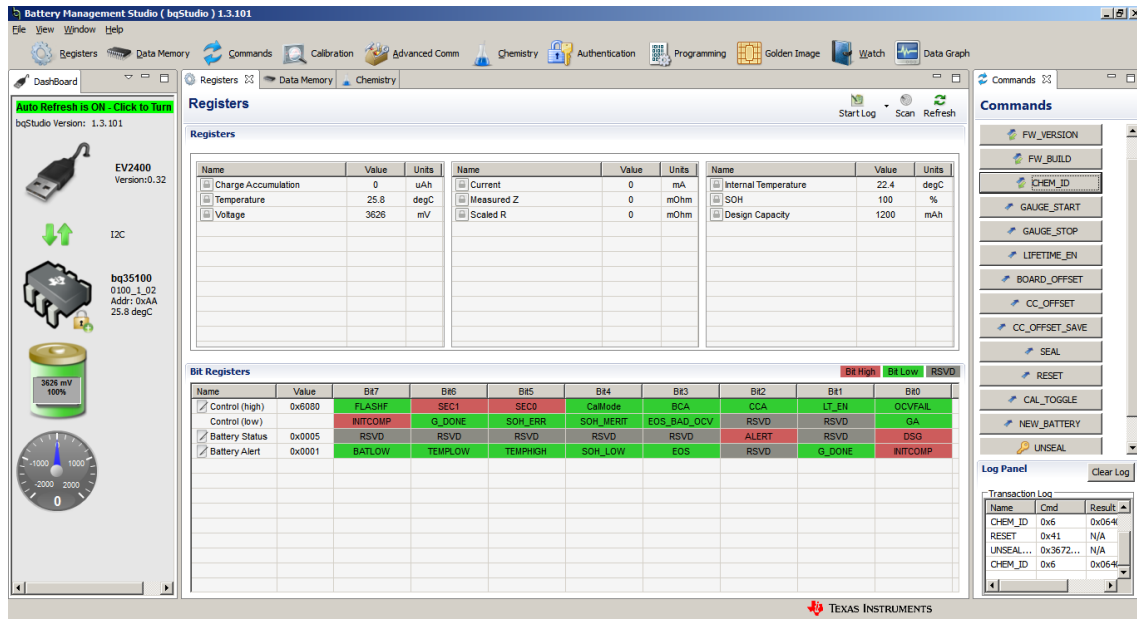
Obr. A.13: Aplikace Battery management studio od TI.



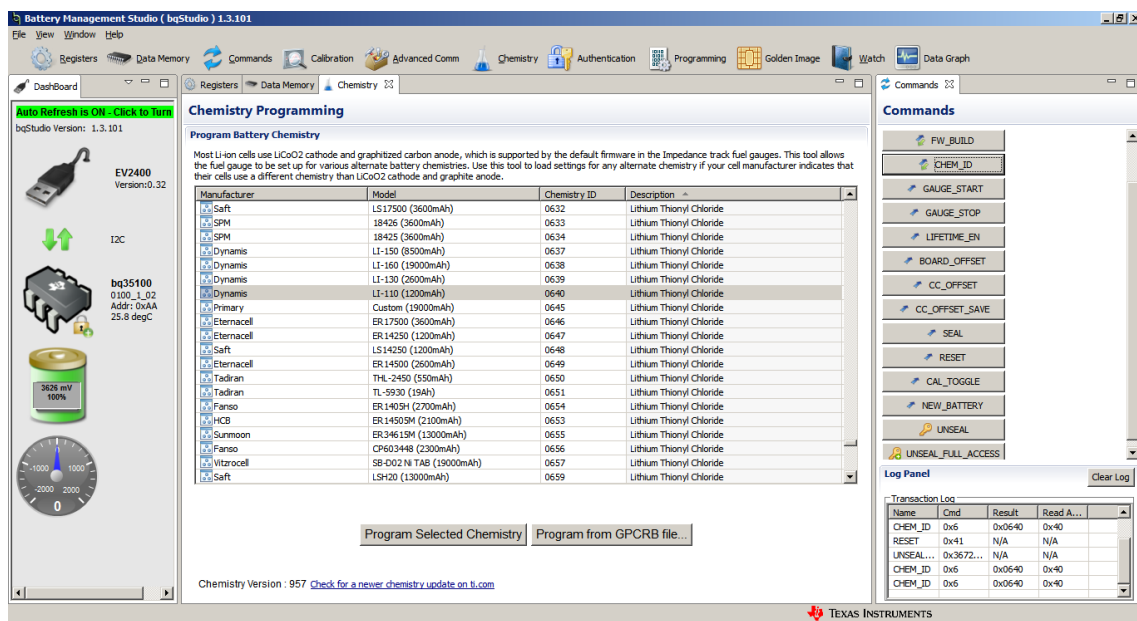
Obr. A.14: Aplikace Battery management studio od TI.



Obr. A.15: Aplikace Battery management studio od TI.



Obr. A.16: Aplikace Battery management studio od TI.



Obr. A.17: Aplikace Battery management studio od TI.



**Registers**

Name	Value	Units	Name	Value	Units	Name	Value	Units
Charge Accumulation	0	μAh	Current	-14	mA	Internal Temperature	22.4	degC
Temperature	25.8	degC	Measured Z	0	mOhm	SOH	100	%
Voltage	3281	mV	Scaled R	0	mOhm	Design Capacity	1200	mAh

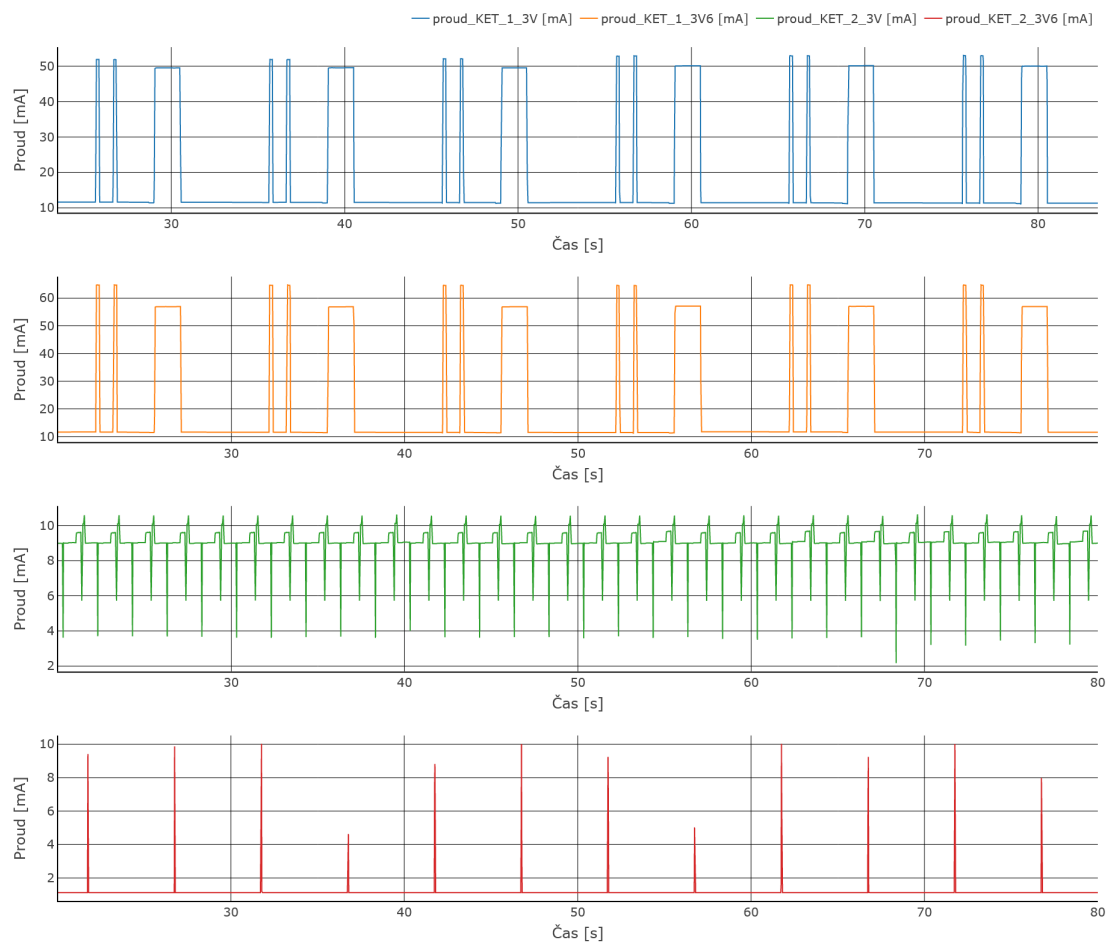
  

**BIT Registers**

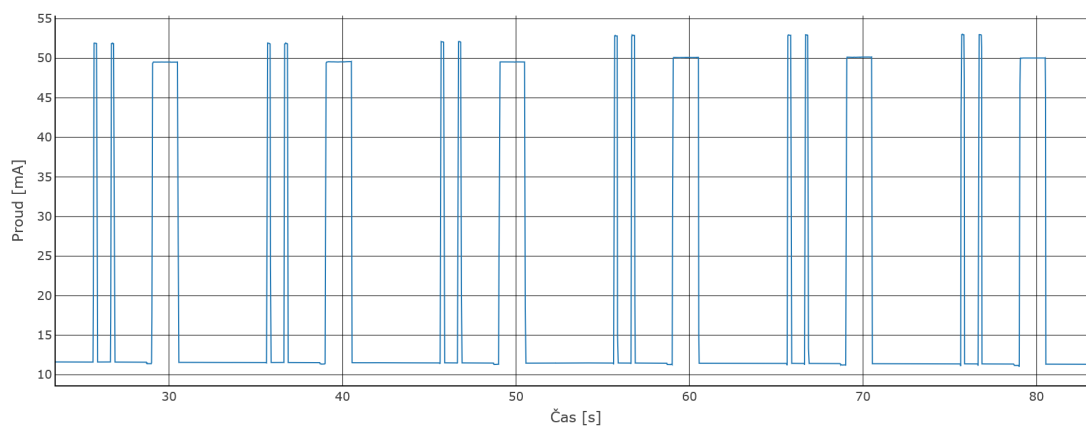
Name	Value	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
Control (high)	0x8081	FLASHF	SEC1	SEC0	CaMode	BCA	CCA	LT_EN	OCVFAL
Control (low)	0x0001	NITCOMP	G_DONE	SOH_ERR	SOH_MERIT	EDS_BAD_OCV	RSVD	RSVD	GA
Battery Status	0x0001	RSVD	RSVD	RSVD	RSVD	ALERT	RSVD	RSVD	DSG
Battery Alert	0x0001	BATLOW	TEMPLOW	TEMPHIGH	SOH_LOW	EOS	RSVD	G_DONE	NITCOMP

Obr. A.18: Aplikace Battery management studio od TI.

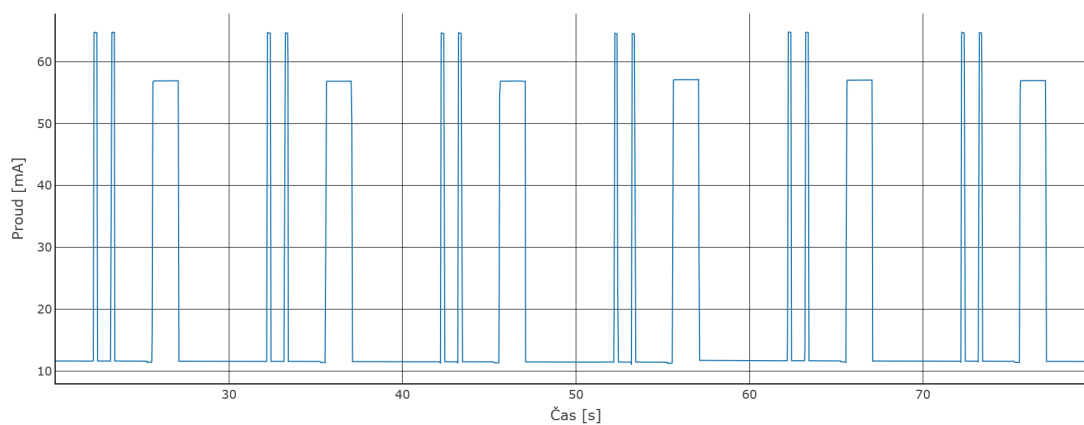
## KETCube - naměřené průběhy proudu



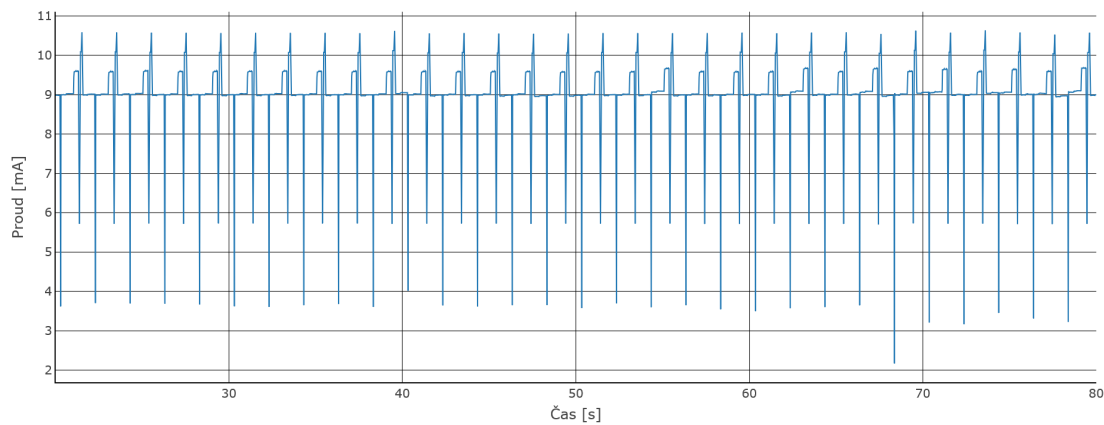
Obr. A.19: Naměřené průběhy obou KETCube - srovnání



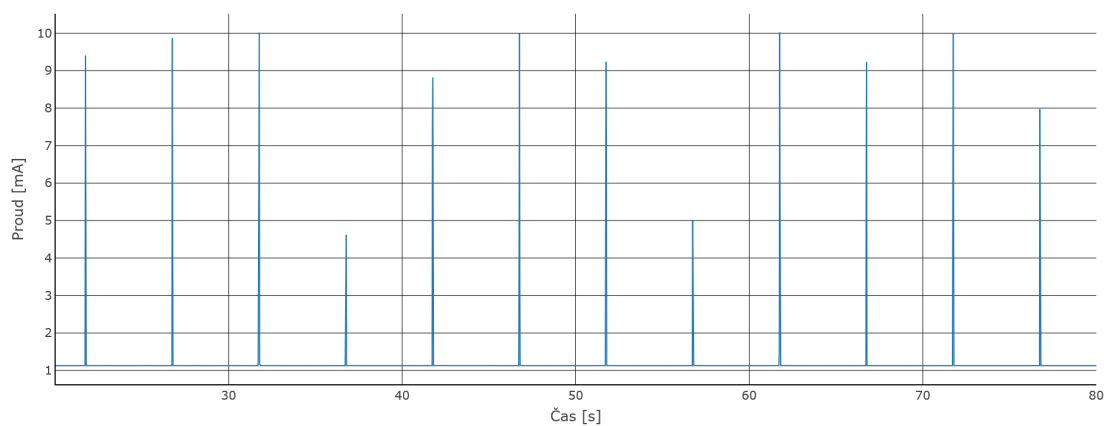
Obr. A.20: Naměřený průběh proudu KETCube-A při napětí 3 V, (1 min).



Obr. A.21: Naměřený průběh proudu KETCube-A při napětí 3,6 V, (1 min).

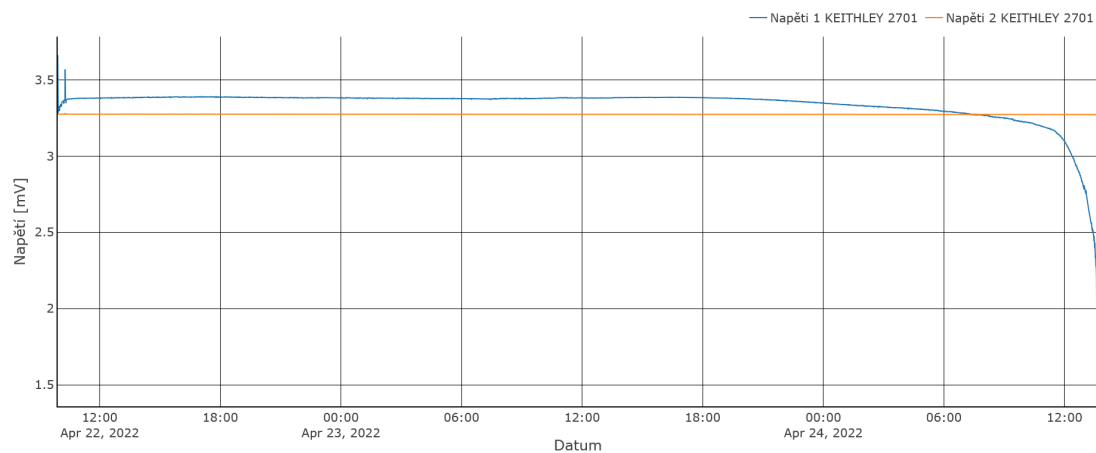


Obr. A.22: Naměřený průběh proudu KETCube-B při napětí 3 V, (1 min).

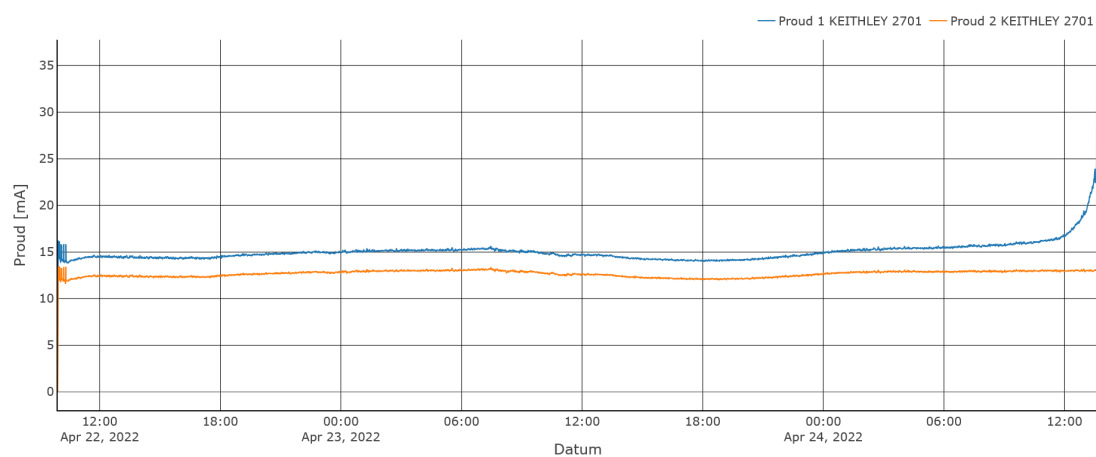


Obr. A.23: Naměřený průběh proudu KETCube-B při napětí 3,6 V, (1 min).

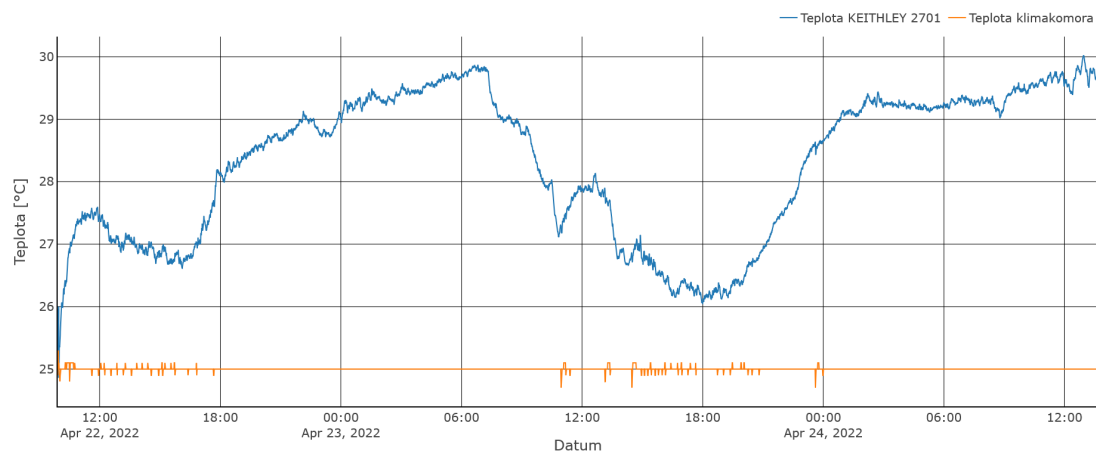
## LTC3335 - konstantní zátěž



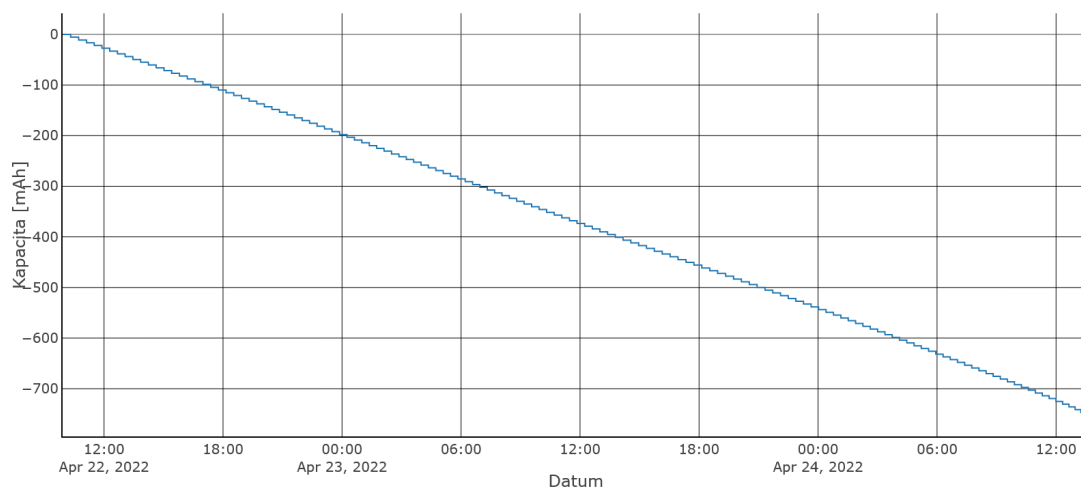
Obr. A.24: LTC3335 napětí.



Obr. A.25: LTC3335 proud.

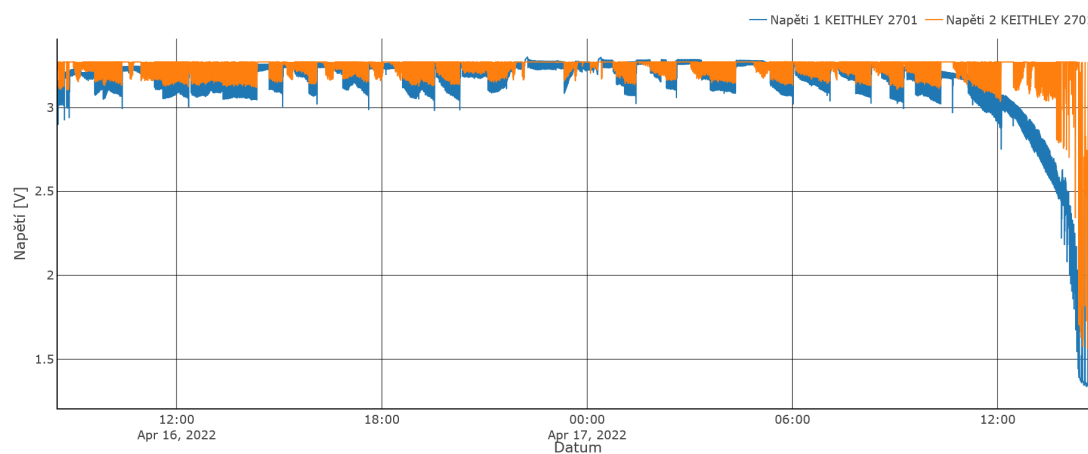


Obr. A.26: LTC3335 teplota.

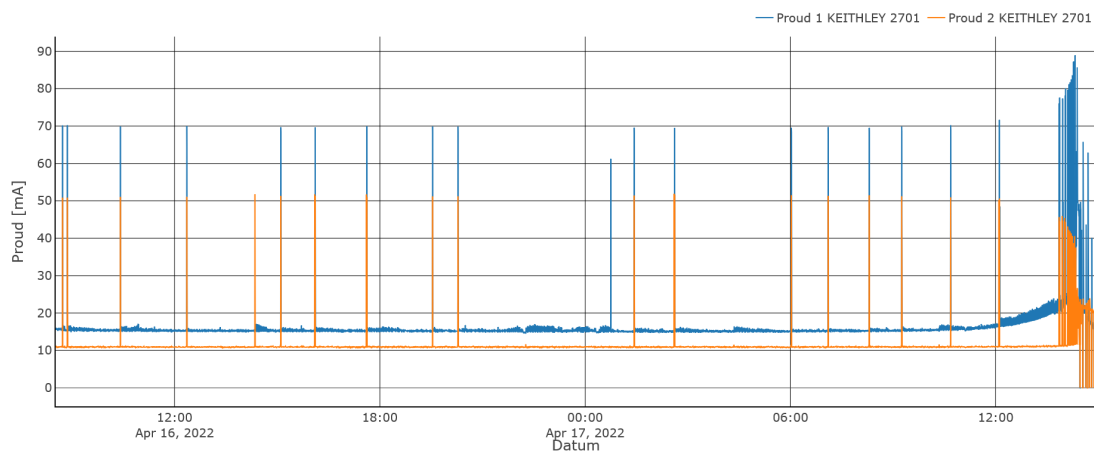


Obr. A.27: LTC3335 vyextrahovaná kapacita z baterie.

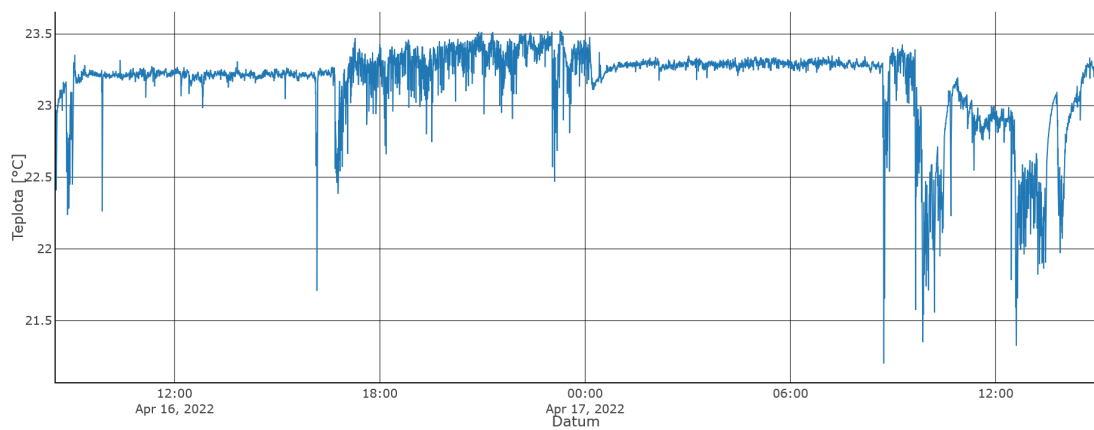
## LTC3335 - proměnná zátěž



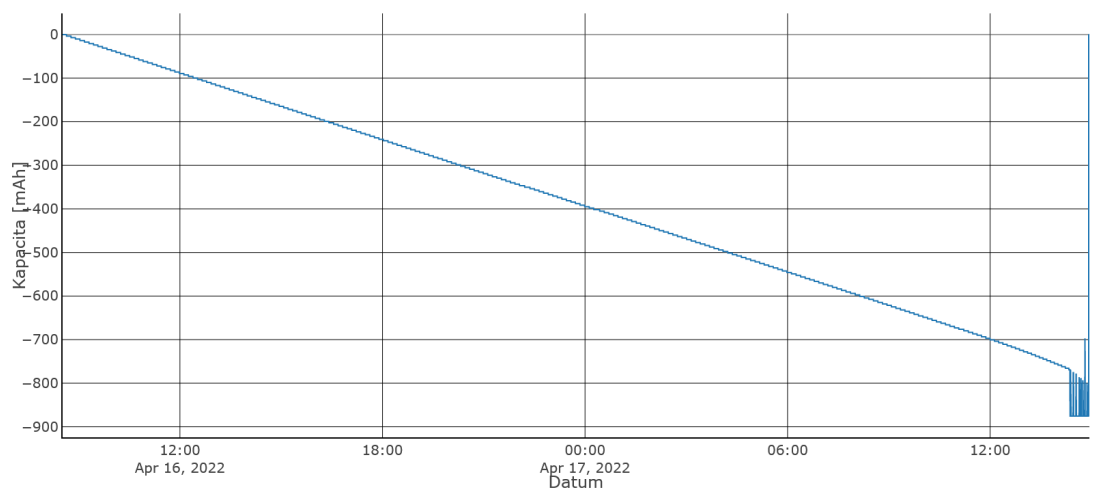
Obr. A.28: LTC3335 napětí.



*Obr. A.29: LTC3335 proud.*

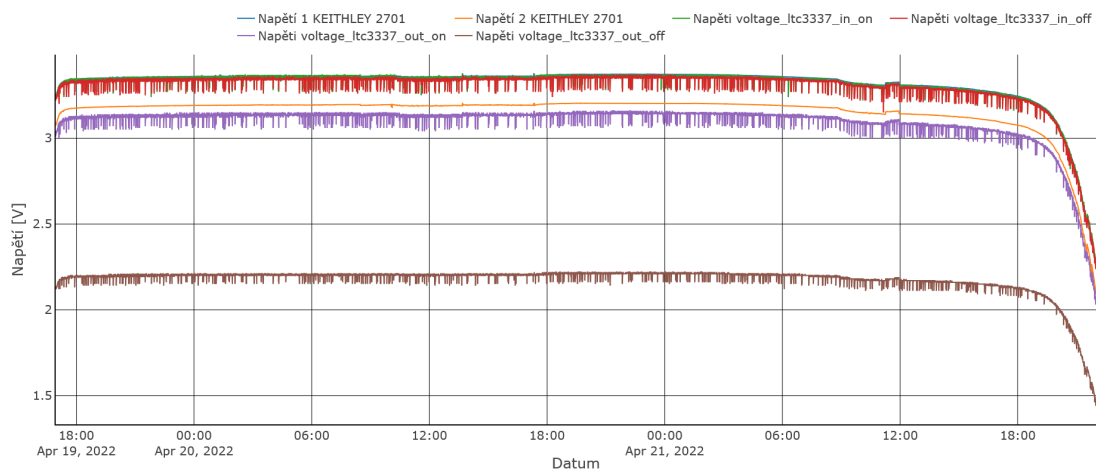


*Obr. A.30: LTC3335 teplota.*

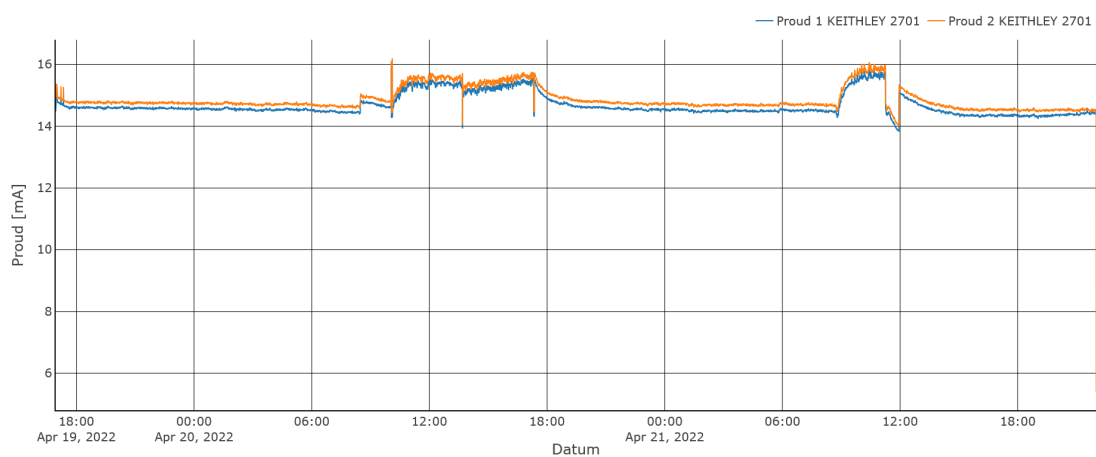


*Obr. A.31: LTC3335 vyextrahovaná kapacita z baterie.*

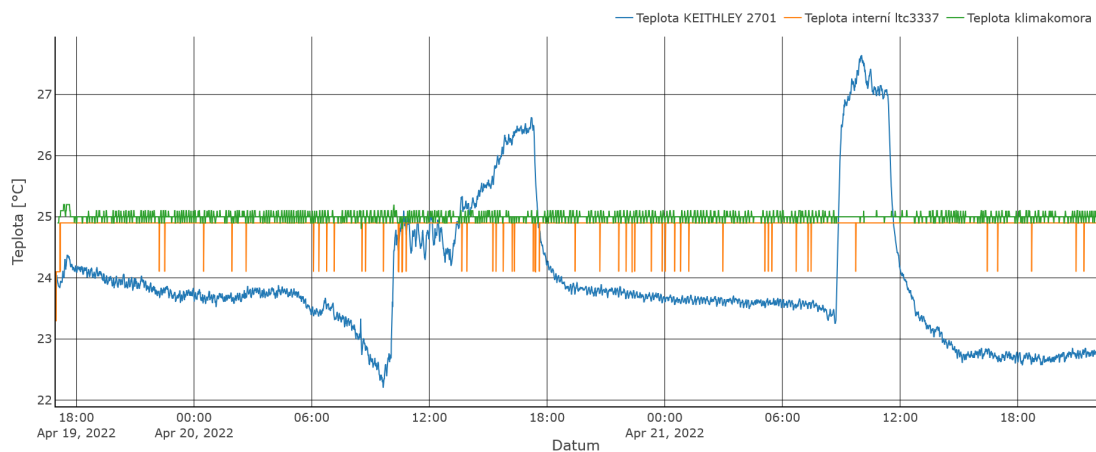
## LTC3337 - konstantní zátěž



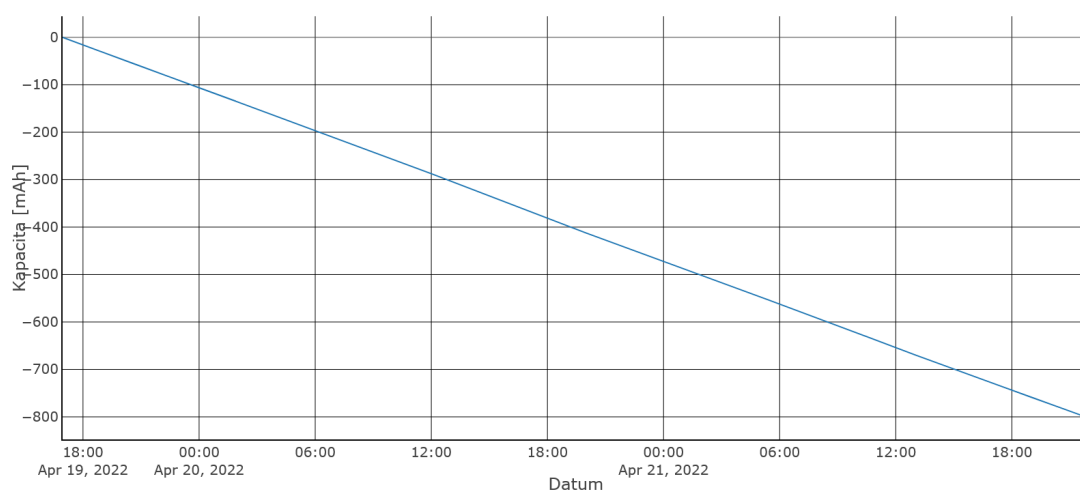
Obr. A.32: LTC3337 napětí.



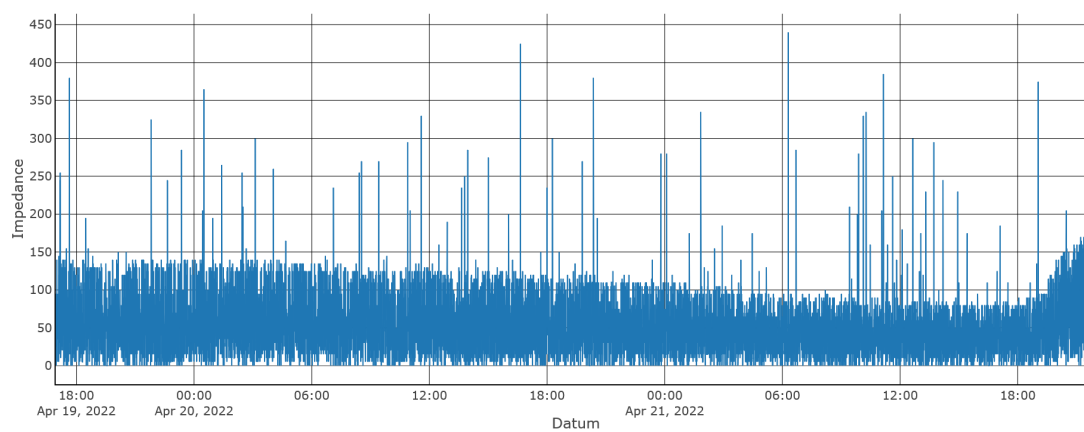
Obr. A.33: LTC3337 proud.



Obr. A.34: LTC3337 teplota.



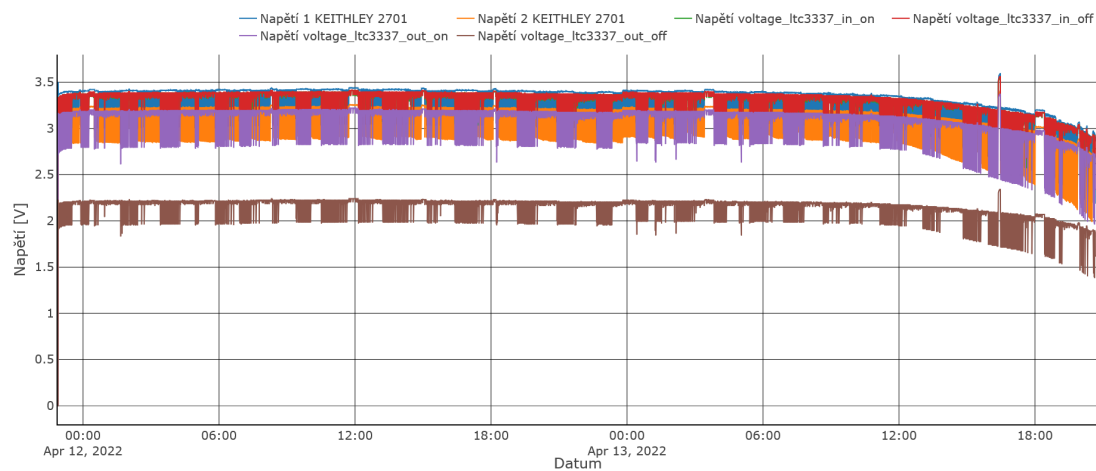
*Obr. A.35: LTC3337 vyextrahovaná kapacita z baterie.*



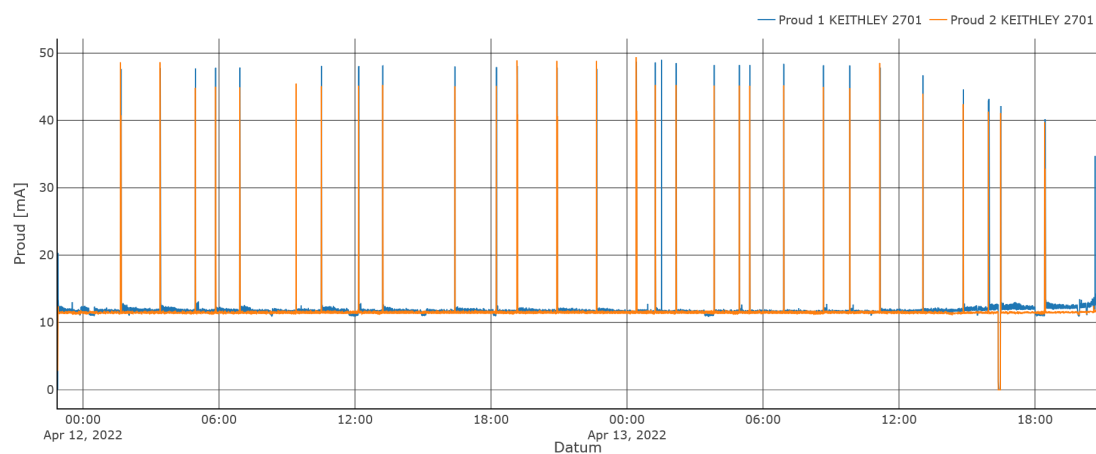
*Obr. A.36: LTC3337 impedance.*



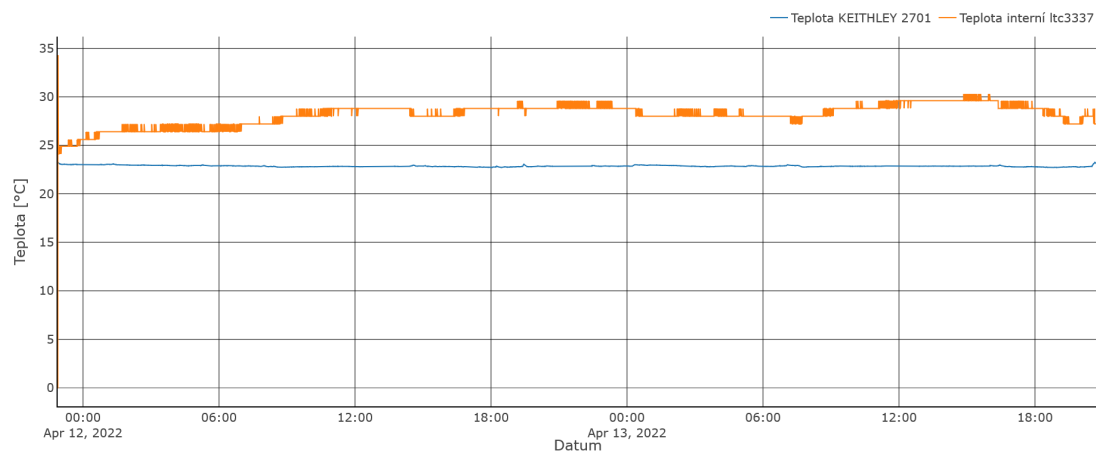
## LTC3337 - proměnná zátěž



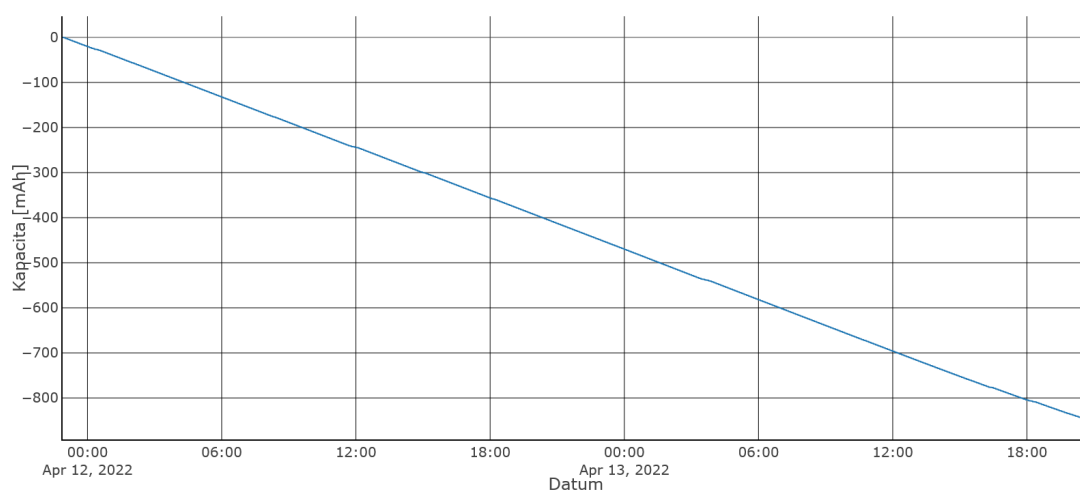
Obr. A.37: LTC3337 napětí.



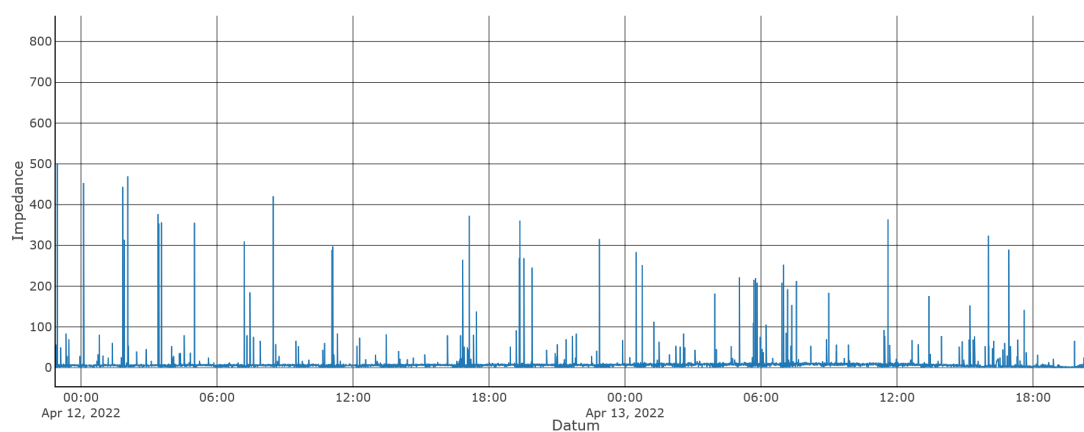
Obr. A.38: LTC3337 proud.



Obr. A.39: LTC3337 teplota.

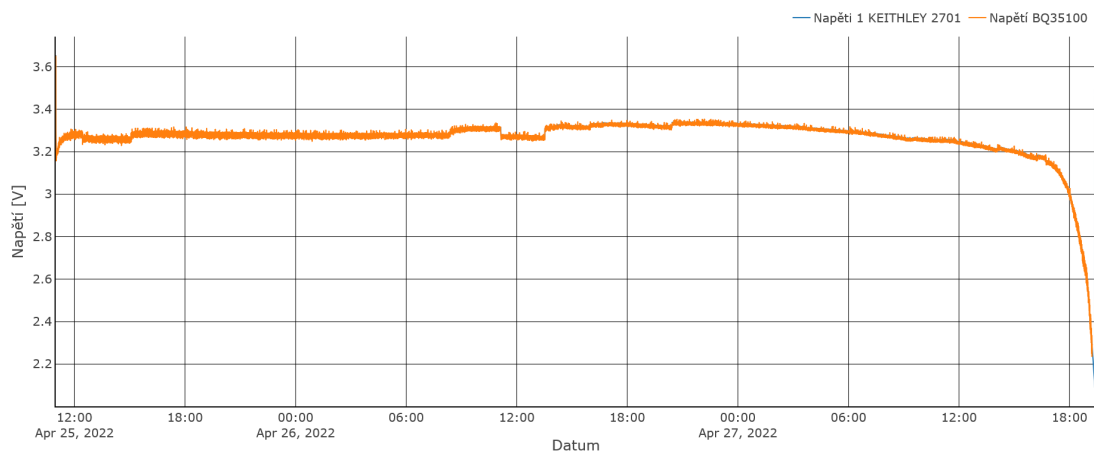


*Obr. A.40: LTC3337 vyextrahovaná kapacita z baterie.*

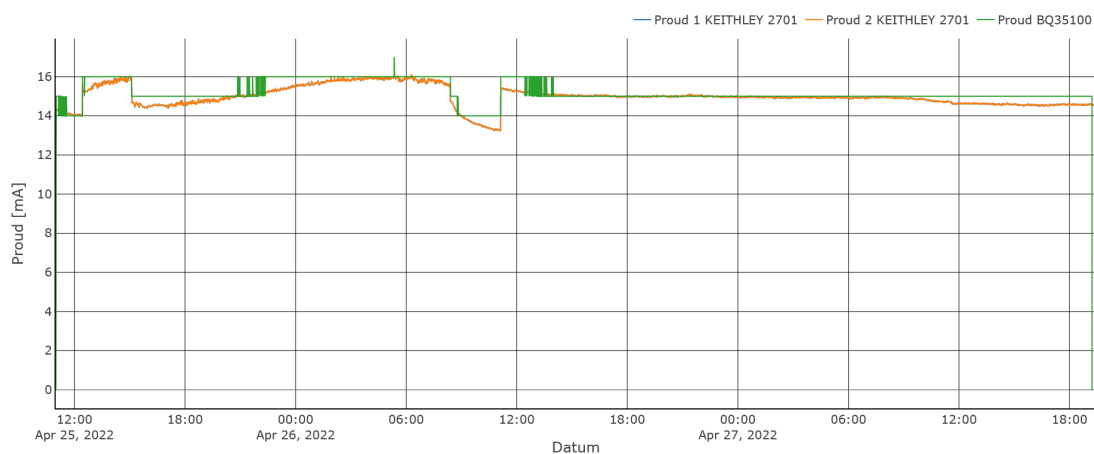


*Obr. A.41: LTC3337 impedance.*

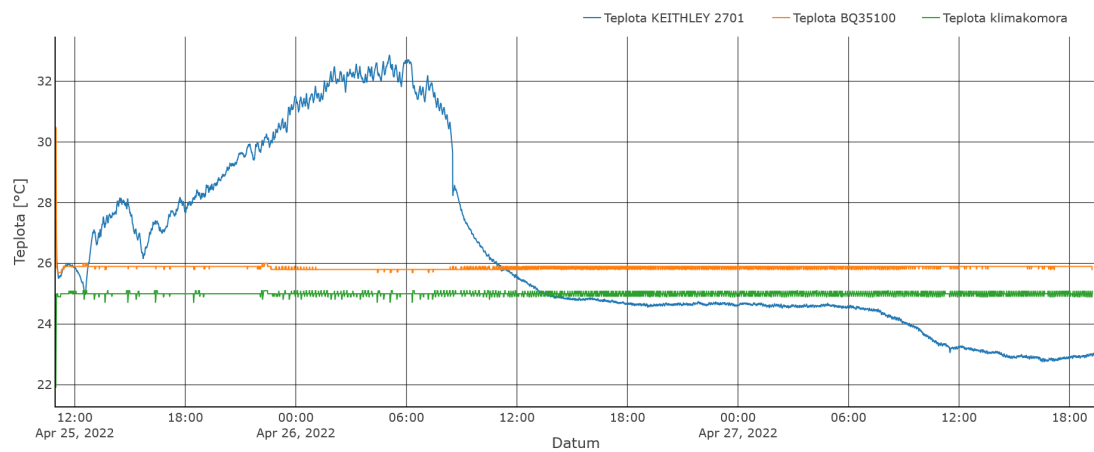
## BQ35100 - ACC, konstantní zátěž



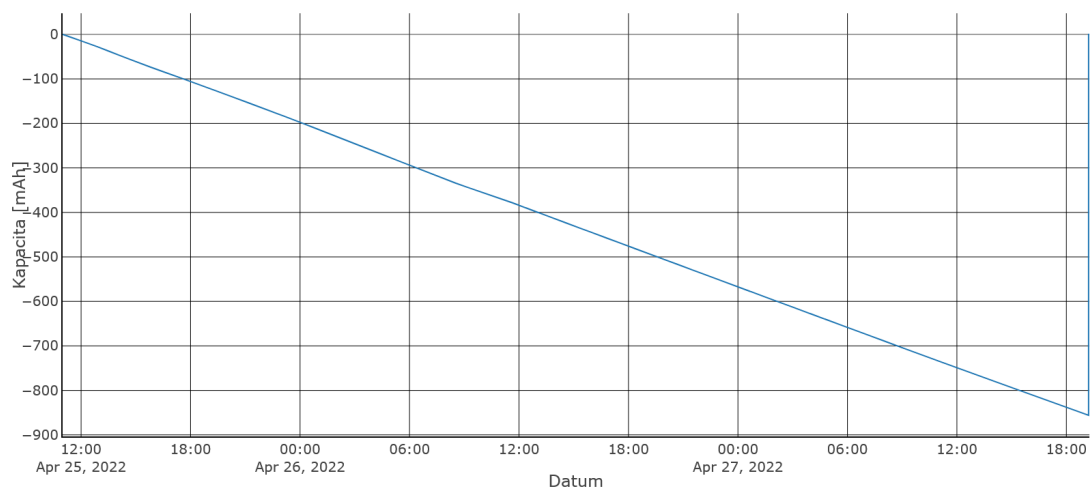
Obr. A.42: BQ35100 napětí - ACC.



Obr. A.43: BQ35100 proud - ACC.

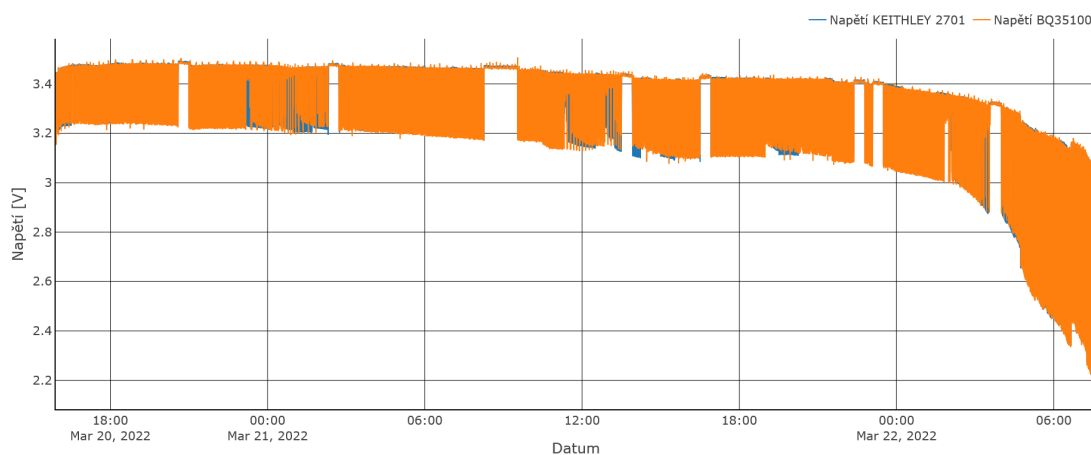


Obr. A.44: BQ35100 teplota - ACC.

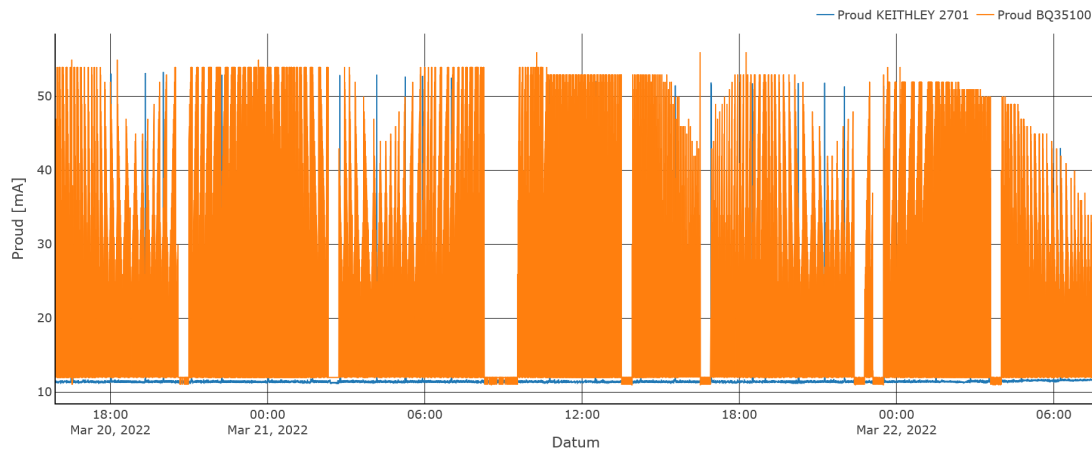


Obr. A.45: BQ35100 vyextrahovaná kapacita z baterie - ACC.

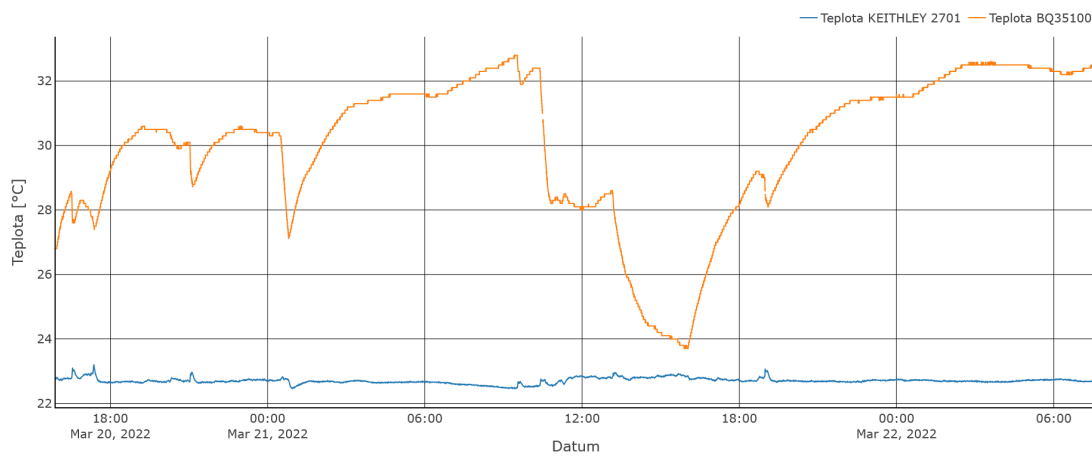
## BQ35100 - ACC, proměnná zátěž



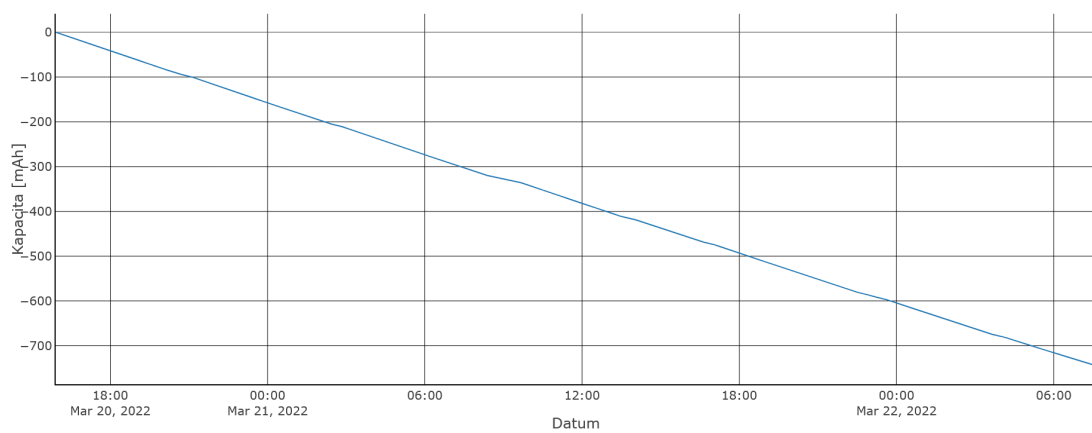
Obr. A.46: BQ35100 napětí - ACC.



Obr. A.47: BQ35100 proud - ACC.

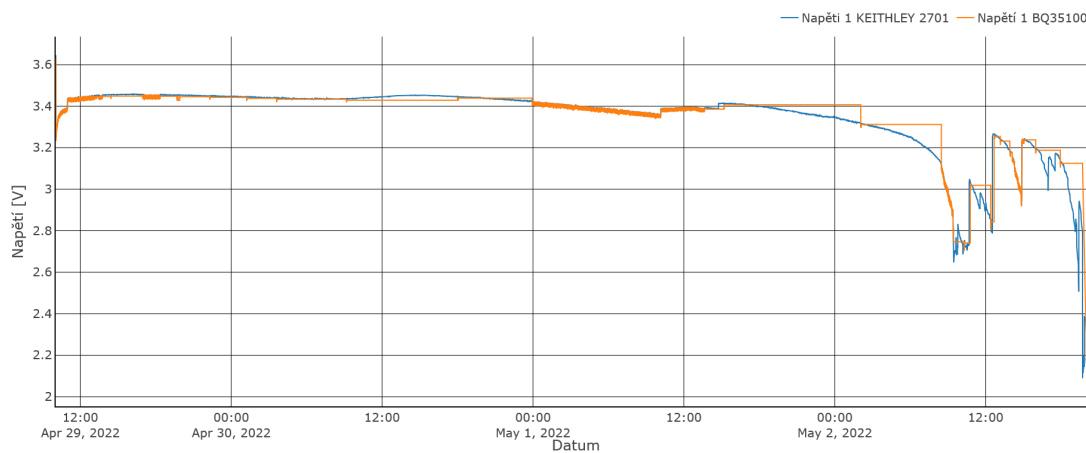


Obr. A.48: BQ35100 teplota - ACC.

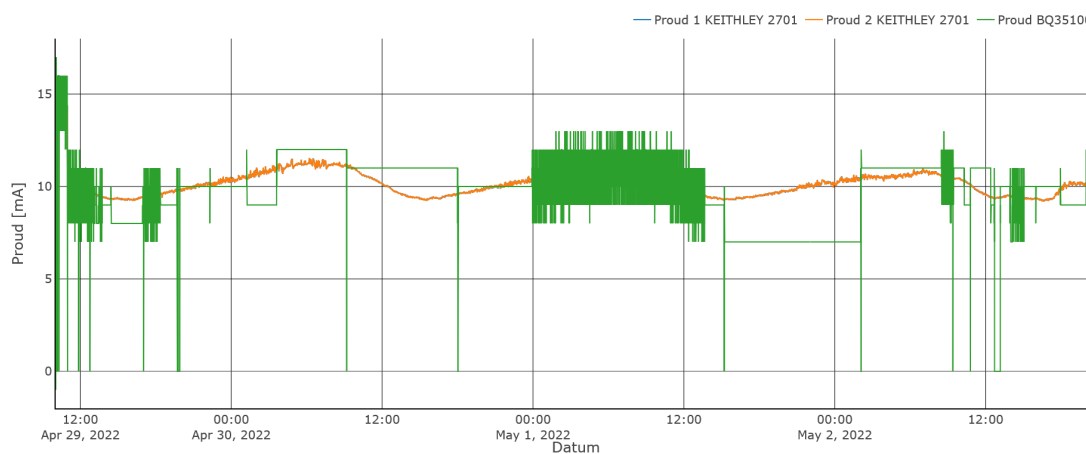


Obr. A.49: BQ35100 vyextrahovaná kapacita z baterie - ACC.

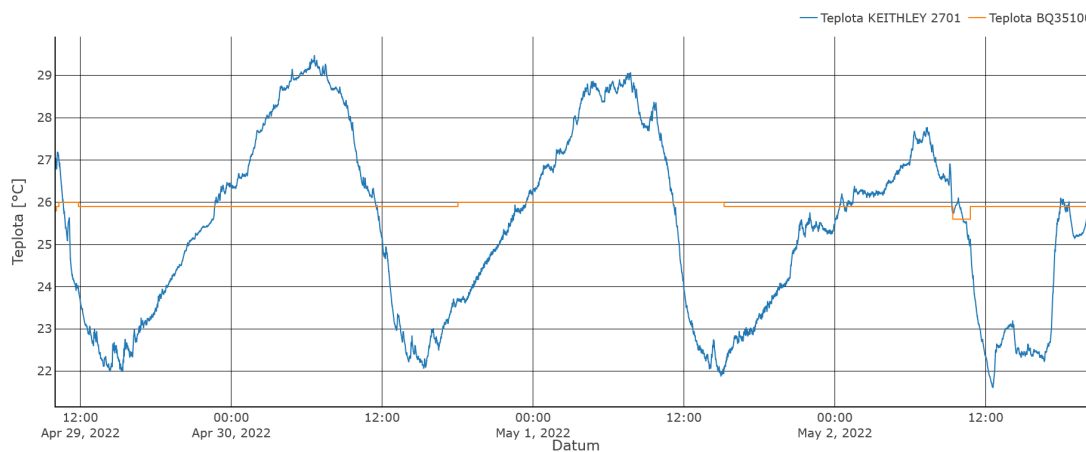
## BQ35100 - EOS, konstantní zátěž



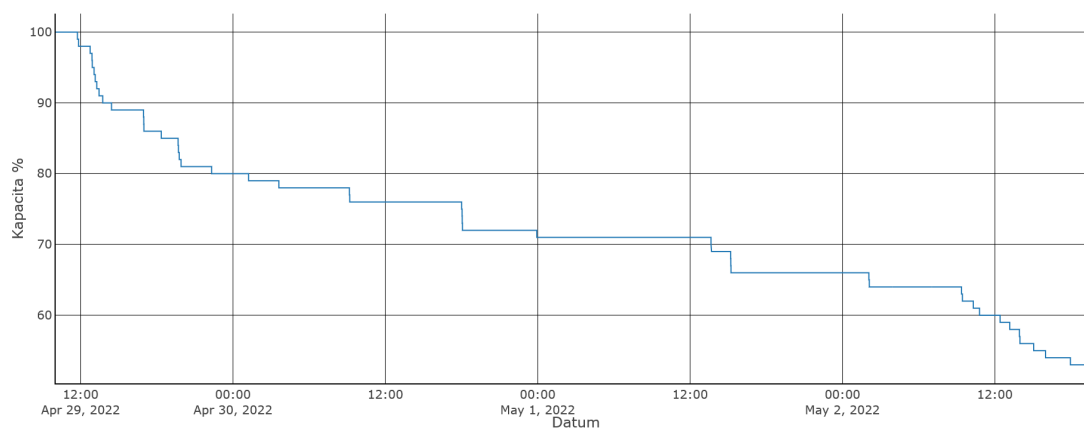
Obr. A.50: BQ35100 napětí - EOS.



Obr. A.51: BQ35100 proud - EOS.



Obr. A.52: BQ35100 teplota - EOS.



*Obr. A.53: BQ35100 kapacita - EOS.*