

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# SYSTÉMY SPRÁVY BATERIÍ PRO MOBILNÍ ROBOTIKU

BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS FOR MOBILE ROBOTICS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**PETR BRABENEC**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. JAN HRBÁČEK**

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky  
Akademický rok: 2013/14

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Brabeneč

kteřý/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

**Systémy správy baterií pro mobilní robotiku**

v anglickém jazyce:

**Battery management systems for mobile robotics**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešeršní studie systémů používaných pro monitoring, nabíjení a balancování bateriových sad - Battery Management Systems (BMS), nutných pro spolehlivý provoz vozidel s elektrickou trakcí a bateriovým napájením.

Práce by měla být zaměřena především na BMS určené pro moderní trakční lithiové články (LiFePO<sub>4</sub>) a jejich použití v robotice.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše principů funkce BMS:

- balancování článků během nabíjení a vybíjení
- vnitřní komunikace systému
- komunikace s nadřazenými systémy

Seznam odborné literatury:

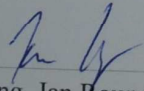
Andrea, D.: Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs, 2010

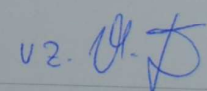
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Hrbáček

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 25.11.2013



  
Ing. Jan Roupec, Ph.D.  
Ředitel ústavu

  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je rešeršní studie systémů používaných pro monitoring, nabíjení a balancování bateriových sad – Battery Management Systems (BMS), nutných pro spolehlivý provoz vozidel s elektrickou trakcí a bateriovým napájením. Práce je zaměřena především na BMS určené pro LiFePO4 články.

## **ABSTRACT**

The goal of this bachelor's thesis is research study of systems mainly used for monitoring, charging and balancing of battery packs – Battery Management Systems (BMS). These systems are necessary for reliable service of vehicles with electric drive and battery power. Study is aimed mainly on BMS used with LiFePO4 cells.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

BMS, balancování LiFePO4, stavy baterie.

## **KEYWORDS**

BMS, balancing LiFePO4, states of battery



## PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Jana Hrbáčka.

.....  
Petr Brabenec  
30.5.2014

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRABENEC, P. *Systémy správy baterií pro mobilní robotiku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 47 s.  
Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Hrbáček.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Hrbáčkovi za čas, trpělivost a odborné vedení při psaní této práce. Dále bych rád poděkoval své manželce a rodině za podporu a trpělivost, kterou se mnou měli.



**Obsah:**

Abstrakt .....	5
Prohlášení o originalitě.....	7
1 Úvod .....	11
2 Li-ion bateriové články .....	13
2.1 LiFePO <sub>4</sub> .....	13
3 BMS systémy .....	15
3.1 Schopnosti BMS .....	16
4 Baterie .....	17
4.1 Nabíjení .....	17
4.1.1 Nabíjení konstantním napětím .....	17
4.1.2 Nabíjení konstantním proudem .....	18
4.1.3 Pulzní nabíjení.....	18
4.1.4 Kombinované nabíjení .....	19
5 BCU – Řídicí jednotka baterie .....	21
5.1 Stav nabití – SOC .....	21
5.2 Zdraví baterie – SOH.....	22
5.3 Životnost baterie– SOL .....	22
5.4 Kapacita .....	22
5.5 Hloubka vybití – DOD .....	23
5.6 Násobky kapacity – C-rate .....	23
5.7 Cyklus .....	24
5.8 Vnitřní odpor .....	24
6 Balancování .....	25
6.1 Způsoby balancování .....	26
6.1.1 Pasivní metody balancování.....	27
6.1.2 Aktivní metody balancování .....	28
6.2 Kdy se balancuje.....	29
6.2.1 Balancování na hranici vybití (Discharge balancing) .....	29
6.2.2 Balancování při plném nabití (Charge balancing).....	29
7 Topologie BMS .....	31
8 Vnitřní komunikace systému.....	33
8.1 SPI – Serial Peripheral Interface .....	33
8.1.1 Fyzická vrstva .....	34
8.2 I <sup>2</sup> C-BUS .....	35
8.2.1 Fyzická vrstva .....	36

8.2.2	Princip přenosu.....	36
8.2.3	Linková vrstva.....	37
9	Komunikace s nadřazenými systémy.....	39
9.1	Sběrnice CAN.....	39
9.1.1	Koncepce CAN .....	39
9.1.2	Fyzická vrstva CAN .....	39
9.1.3	Linková vrstva CAN .....	39
9.1.4	Synchronizace uzlů CAN .....	40
9.1.5	Datové rámce protokolu CAN.....	41
10	Závěr.....	43
11	Zdroje .....	44
	Přílohy .....	47

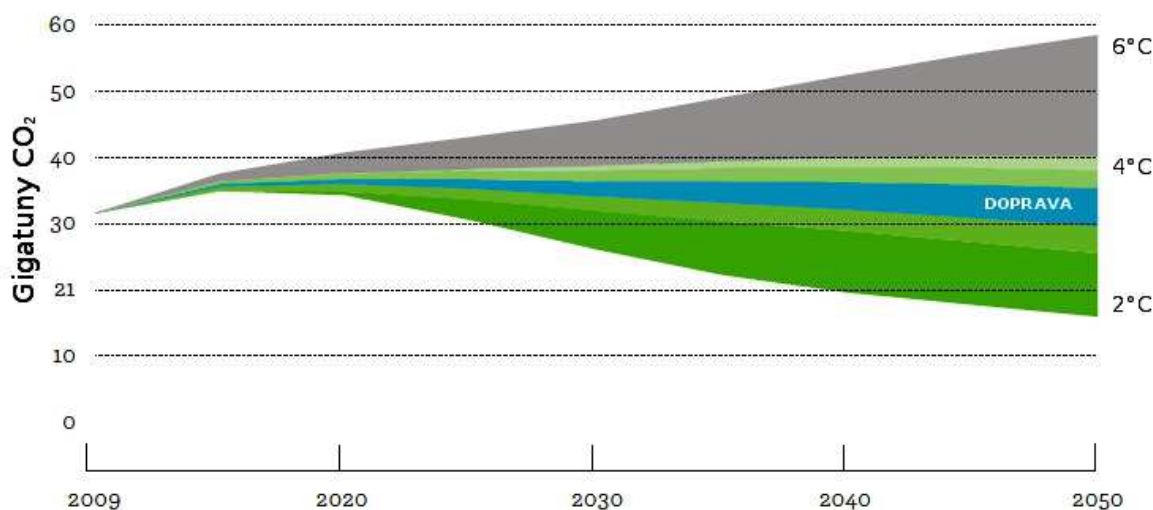
# 1 ÚVOD

V současné době jsou BMS systémy nezbytnou součástí každého elektrického vozidla (dále EV ... mopedy, hybridy, elektromobily) a to především kvůli nezbytnosti zvýšit výkon/životnost baterií.

Trendem současné doby je nahradit fosilní paliva alternativním zdrojem energie. Každým rokem se zásoby ropy ztenčují a je jen otázkou času, než cena fosilních paliv bude natolik vysoká, že i přes vyšší pořizovací náklady bude zakoupení EV výhodnější. [1]

Od roku 1991, kdy byla zahájena komerční výroba Li-ION článků, Lithium Ion baterie vypsely a posledním trendem pro EV jsou LiFePO<sub>4</sub> baterie (ve velké míře jsou také používány LiFeYPO<sub>4</sub>). Tyto baterie zatím plně nenahrazují fosilní paliva, nicméně již získaly své příznivce a prostor pro snižování spotřeby fosilních paliv, ať již ve formě hybridních vozidel, případně čistých elektromobilech. V roce 2012 představila Toyota svůj plug-in hybrid Toyota Prius, který během velmi krátké doby měl daleko větší prodeje, než jeho konkurenti.

Další problematickou otázkou současnosti je tvorba oxidu uhličitého a s ním související zhoršování skleníkového efektu. Vzhledem k závažnosti situace by měly být emise CO<sub>2</sub> v následujících 40 letech redukovány. Jak lze na grafu níže vidět, bude redukce CO<sub>2</sub> v dopravě celkem markantní, to a mnoho dalších faktorů výrazně pomáhají posílit EV jejich pozici na trhu. V případě absolutního nahrazení vozidel se spalovacími motory elektromobily nedojde k absolutnímu snížení emisí, ale tvorba CO<sub>2</sub> se přesune z motorů automobilů do elektráren.



## OBLASTI

- Výroba energie 42%
- Budovy 12%
- Doprava 21%
- Další změny 7%
- Průmysl 18%
- Ostatní Emise (6°C scénář)

Redukce CO<sub>2</sub> (časový výhled 40 let). Převzato z [1]



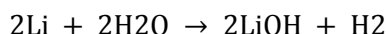
## 2 LI-ION BATERIOVÉ ČLÁNKY

Li-ion baterie se řadí mezi akumulátory lze je tedy po vybití znovu nabíjet. První experimenty s nimi prováděl G.N. Lewis už v roce 1912. Další práce zabývající se Li-ion bateriemi byly až v 70tých letech 20.st. , kde M. Stanley Whittingham použil jako elektrody  $Ti_nS$  a Li. Souběžně s vývojem elektrod pracoval J. O. Besenhard na uhlíkových interkalačních sloučeninách a doporučil jejich použití pro galvanické články. V roce 1991 byla poprvé komerčně vyrobena Li-ion ( $LiCoO_2$ ) baterie a to firmou Sony.

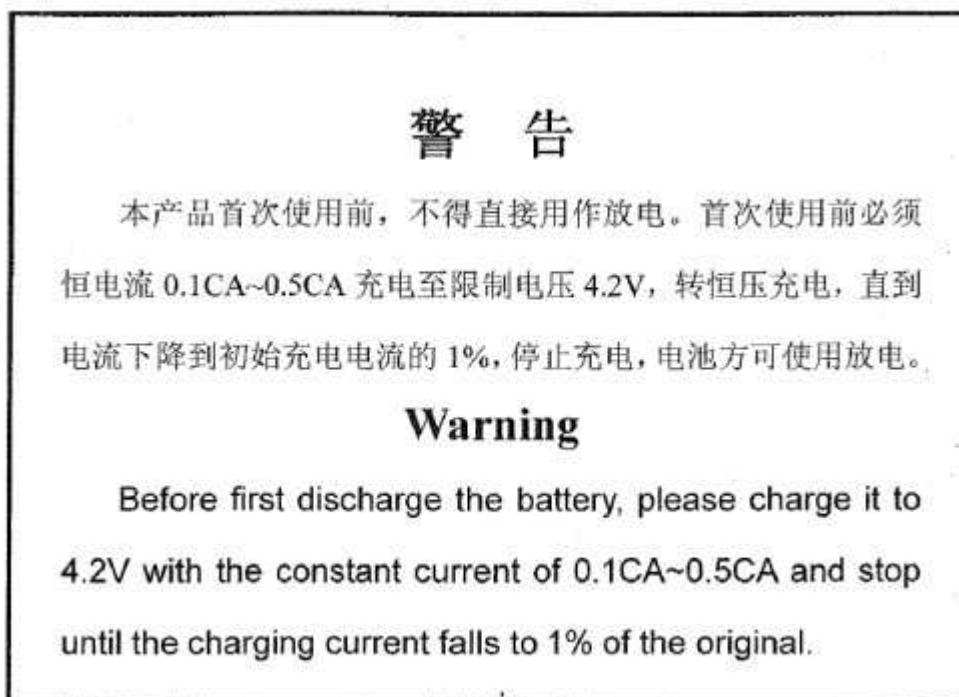
Od výroby první komerční baterie byly na elektrody použity různé materiály a jejich kombinace, baterie jsou vyráběny v různých velikostech a tvarech. Díky jejich velké rozmanitosti, absenci *paměťového efektu* a velké *energetické hustotě* se rozšířily do každodenních aplikací osobní elektroniky.

### 2.1 $LiFePO_4$

Díky vysoké energetické a výkonnostní hustotě lithia je tento materiál skvělým kandidátem na materiál elektrod. Výkonnostní hustota je měřítko, kolik energie se může uvolnit v průběhu vybíjení. Energetická hustota poukazuje na množství uložené energie. Hliník a hořčík jsou kovy, které mají lepší vlastnosti, než lithium, nicméně je mnohem výhodnější použití lithia díky jeho nižší reaktivitě a lepším mechanickým charakteristikám. I přesto lithium silně reaguje s vodou, kdy uvolňuje vodík a vytváří hydroxid lithný.



Tato reakce vyzařuje teplo, kterým může vzplanout vodík a zapálit lithium. Li-Ion bateriové články obsahují i další sloučeniny, než jen sloučeniny lithia. Reálné množství lithia v bateriovém článku je pouze 3%. [2]



Varování na bateriových člancích Thunder Sky [3].

Mnozí výrobci  $LiFePO_4$  baterií (za předpokladu, že se jedná o baterii složenou z více, než jednoho článku) uvádějí nezbytnost *Počátečního nabití* („inicializační nabití“ viz Obr.2). Inicializačním nabitím se rozumí nabití jednotlivých článků baterie na hodnotu 4,2V. Tímto krokem se v baterii správně inicializuje chemická reakce a baterie bude fungovat déle.

V současné době není možné dosáhnout Li-ion bateriemi na energetickou hustotu jako mají fosilní paliva, ale vezme-li se v potaz cenu paliv a ekologická závadnost látek vznikajících při jejich spalování, klesnou i požadavky na energetickou hustotu na úkor zdraví populace.

Označení	Typ	En. Hustota	Životnost cyklů
LiCoO <sub>2</sub>	Baterie	>200 Wh/kg	>500
LiFePO <sub>4</sub>	Baterie	>120 Wh/kg	>2000 (0,2C)
Natural	Palivo	12343 Wh/kg	-
Diesel	Palivo	12621 Wh/kg	-
LPG	Palivo	12788 Wh/kg	-

Baterie LiFePO<sub>4</sub>, mají obrovskou výhodu oproti ostatním bateriím z této rodiny a tou je množství cyklů a bezpečnost použití. I v případě poškození přebitím při nabíjení, tato baterie nezačne hořet „pouze“ se nafoukne a zkrátí se životnost (počet cyklů). Obecně napětí v baterii nesmí přesáhnout maximální a zároveň nesmí klesnout pod minimální pracovní napětí. Každá baterie trpí samovybíjením, takže se doporučuje udržovat baterie nabité. V případě, že napětí v baterii, či bateriovém článku klesne pod minimální pracovní napětí, nemusí se povést bateriový článek již znovu oživit, toto je dáno nezbytnou chemickou reakcí, která v baterii probíhá.

### 3 BMS SYSTÉMY

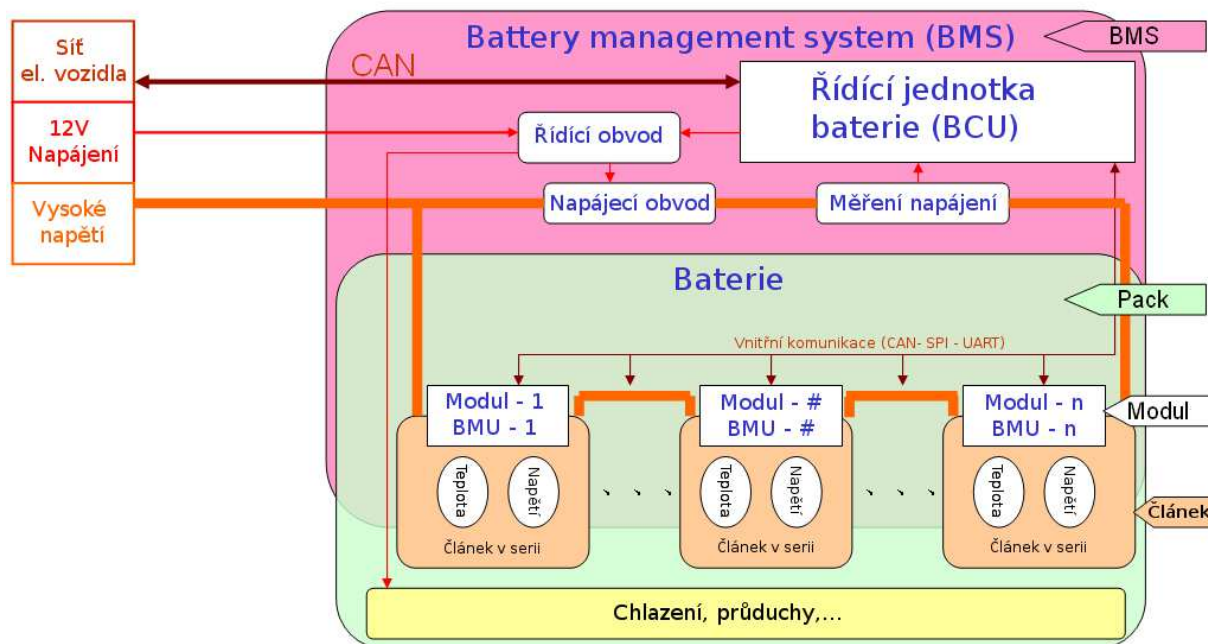


Schéma BMS; Přejato z [4]

Typický BMS je možné rozdělit do několika funkčních vrstev, v této práci bude uvažováno s BMS rozdělenými na 3 úrovně. Těmi jsou moduly (na jednotlivých článcích), řídicí obvody (na bateriích) a řídicí jednotka. Toto rozdělení bude pojato k hierarchii složení a řízení provozu baterie. [4]

Aby bylo omezeno nebezpečí při používání baterií (při nabíjení přebití na vyšší než povolenou hodnotu, nebo při vybíjení nebezpečí poklesu napětí pod kritickou mez) je nezbytně nutné nastavit parametry pro používání baterií.

Baterie je složená z několika článků, které jsou zapojeny do série a každý z těchto článků má stejné limity pro používání (provozní rozsah napětí stanovený výrobcem). Nesmí být nabity na vyšší napětí než 3.6V [8] a jejich napětí nesmí klesnout pod hladinu 2V. Při nabíjení obyčejným CCCV nabíječkou (Constant current - constant voltage = konstantní proud – konstantní napětí) se dostáváme do situace, kde nám hrozí snížení počtu cyklů u některých článků. Při používání CCCV nabíječky bylo zvykem nabíjet konstantním proudem téměř do plného nabití a poté držet konstantní napětí pro dorovnání potenciálů. Při použití CCCV nabíječky stačilo dříve využívat 2 fázového cyklu nabíjení:

- 1) Nabití
- 2) Vybití

36V



Při použití LiFePO4 baterií musíme zavést 3. stav a tím je balancování. Tím zamezíme přebití, nebo neúplnému nabití bateriových článků viz obrázek výše.

- 1) Nabití
- 2) Dobalancování
- 3) Vybití

### 3.1 *Schopnosti BMS*

Moderní BMS by měl mít tyto schopnosti:

- Sběr dat
- Ochrana baterie
- Schopnost zjistit a předpovědět stav baterie
- Kontrola nabíjení a vybíjení
- Kontrola a řízení tepla (thermal management)
- Sdělení stavu baterie a ověření Uživatelskému rozhraní (dále UI – rozebráno v kapitole komunikace s nadřazeným systémem)
- Komunikace s ostatními komponenty baterií
- Prodloužení životnosti

Inteligentní BMS pro použití v robotice a automobilovém průmyslu musí být schopen nabídnout komplexní řešení a samozřejmě musí být schopen sdělit uživateli kolik energie je ještě v bateriích případně odhadnout včasnou dobu pro nouzové dobití baterií (obdoba u ručičky s ukazatelem množství benzínu u automobilů).

Tato informace není jednoduše změřitelná, ale dá se odvodit na základě matematického modelu baterie a aplikování metod pro práci s tímto modelem.



## 4 BATERIE

Napětí bateriových článků se obvykle pohybuje v rozsahu 3-4V avšak v reálných aplikacích je potřeba vyšší napětí, používá se více bateriových článků zapojených dohromady. Tyto články potom souhrnně nazýváme baterie (Battery pack).

Způsoby zapojení jednotlivých článků [5] :

*Sériově:*

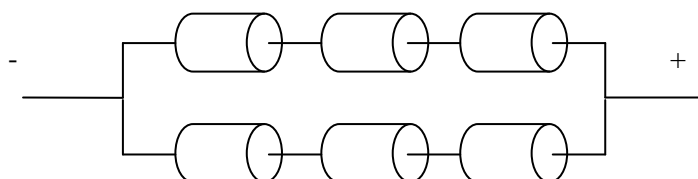
V případě zapojení více článků do série se zvýší svorkové napětí celé baterie (sčítá se napětí takto zapojených článků). Při nabíjení takto zapojené baterie se musí přihlížet k nabití jednotlivých článků baterie a problematiky s tím spojenou (*balancování*). Každý jednotlivý článek baterie má svůj funkční rozsah a při nabíjení bateriových článků v sérii se energie neukládá v rovnoměrném rozložení, ale spolu se stárnutím baterie se častěji stává, že některý článek se dostane na hraniční hodnotu a vypne nabíjení/vybíjení. (v případě, že při nabíjení nebalancujeme)

*Paralelně:*

Při paralelním zapojení článků se sčítá kapacita těchto článků. Za předpokladu, že vnitřní odpor jednotlivých větví je roven, je proud odebírán rovnoměrně ze všech větví.

*Kombinace:*

Nejčastěji jsou v průmyslovém použití aplikovány oba způsoby zároveň. Například v noteboocích bývá použito 6, nebo 8 článků. Obvykle jsou zapojeny ve dvou větvích po polovičním počtu. Tedy:



Tímto zapojením získáme dvojnásobnou kapacitu (jednoho článku) a trojnásobné napětí (jednoho článku)

### 4.1 Nabíjení

Nabíjení baterií může být provedeno několika způsoby, naneštěstí, ne všechny jsou vhodné pro použití s Li-ion bateriemi. Důležitý faktor, který by měl být při nabíjení zohledněn je, že baterie může být nabíjena různými *kapacitními poměry* (viz 9.6) a jako nejvýhodnější (pro dosažení delší životnosti) se jeví pomalé nabíjení nízkým proudem. [6]

#### 4.1.1 Nabíjení konstantním napětím

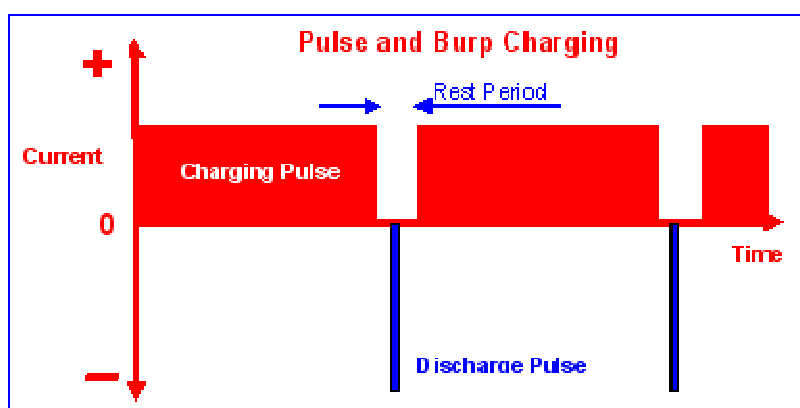
Nabíjení konstantním napětím je metoda, při které se nabíjí téměř konstantním napětím po celou dobu nabíjení (neuvažuje se Stav nabití baterie viz 9.1). Nabíječky, které nabíjejí konstantním napětím, dodávají velké proudy z počátku nabíjení kvůli velkým rozdílům v potenciálech nabíječka/baterie. Tento druh nabíječek je schopen dodat 70% předchozího vybití během 30 minut. Čím více je baterie nabitá tím menší je rozdíl potenciálů mezi baterií a nabíječkou a dochází k rapidnímu snížení nabíjecího proudu. I přes počáteční rychlé nabití je pro plné nabití potřeba baterii nabíjet po delší dobu. [7]

## 4.1.2 Nabíjení konstantním proudem

Při nabíjení konstantním proudem nabíječka mění nabíjecí napětí tak, aby udržovala konstantní nabíjecí proud (nezvažuje se Stav nabití baterie ani teplota baterie). Nabíjení se vypne při dosažení napětí plně nabitého článku (baterie).

## 4.1.3 Pulzní nabíjení

Pulzní nabíječky pouští do baterie proud v krátkých pulzech. Nabíjecí poměr je dán délkou jednotlivých pulzů (obvykle se pohybují kolem 1s). Mezi těmito pulzy jsou *Odpočinkové periody* (20-30ms), které poskytují elektrolytu v baterii čas na provedení nezbytných chemických reakcí. Touto metodou se redukuje množství nechtěných chemických reakcí na povrchu elektrody (vznik plynů, růst krystalů, koroze). V případě potřeby je možné v průběhu *Odpočinkové periody* změřit napětí OCV (9.1).



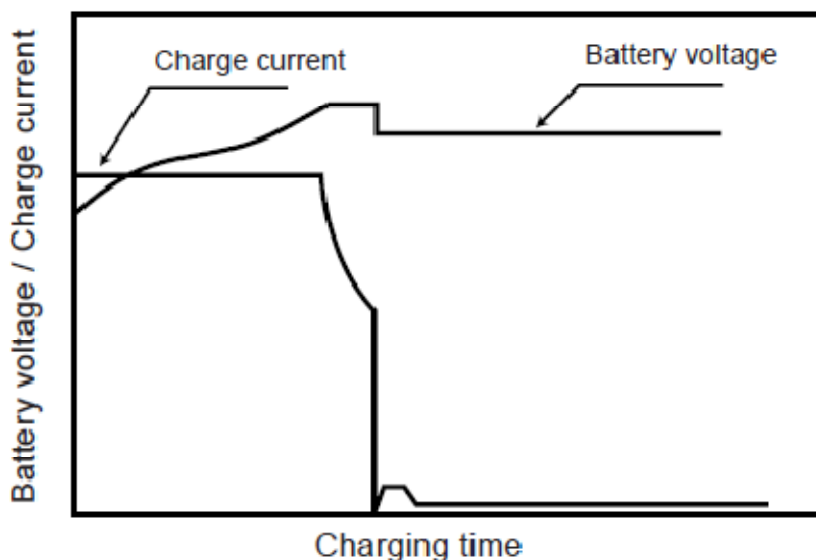
*Pulzní nabíjení; přejato z [8]*

#### 4.1.4 Kombinované nabíjení

Ve spoustě aplikací se kombinují jednotlivé způsoby nabíjení, případně rozšiřují nabíjecí cykly.

##### *2-Stupňové nabíjení konstantním napětím*

K 2-stupňovému nabíjení konstantním napětím jsou zapotřebí zdroje konstantního napětí. V první fázi nabíjení se baterie připojí k prvnímu zdroji s omezením proudu nastavenému na vysoké napětí a nechá se připojena až do chvíle, kdy je ampérmetrem změřen pokles na přednastavenou hodnotu. Po naměření poklesu dojde k přepojení na druhý zdroj napětí, který je nastaven na požadované napětí v baterii a dorovná napětí baterie do stavu plného nabití. Hlavní výhodou tohoto druhu nabíjení je velmi rychlé nabití baterie díky vysokému nabíjecímu proudu.



*Kombinované nabíjení; přejato z [9]*



## 5 BCU – ŘÍDICÍ JEDNOTKA BATERIE

Řídicí jednotka baterie je nejvyšší vrstva BMS (z kapitoly 7), která má na starosti veškeré vyhodnocování nebezpečí, stavů baterie a řízení provozu baterie. Obvykle je v BCU přeprogramován model baterie, ze kterého se vychází při zjišťování některých stavů a kondice baterie.

Tento model představuje simulaci reálného systému za použití matematických a fyzikálních vztahů a metod pro práci s ním. Vzhledem ke skutečnosti, že baterie je obvykle složena z více sérioparalelně spojených článků musí být přesný stav baterie odhadnut dle stavu jednotlivých článků. Díky tomuto modelu je BCU schopna stanovit aktuální použitelnou energii v baterii (v %). Případně odhadnout dobu výdrže baterie při určitém zatížení. Důležité parametry, které se zavádí na modelu baterií jsou označovány jako „stavy“ (z anglického *state of charge, state of health, ...*).

Mezi nejdůležitější stavy baterií patří především *stav nabití* (state of charge), díky kterému dostává nadřazený systém/uživatel povědomí o použitelné zbývající energii v baterii (v %). Dalšími důležitými pojmy jsou *životnost* a *hloubka vybití*.

### 5.1 Stav nabití – SOC

Obvykle označován jako *State of Charge* (proto SOC)

Nejdůležitější informace pro nadřazený systém/uživatele je povědomí o množství použitelné energie, případně stanovení času do plného vybití baterie.

Zjištění stavu nabití (dále SOC) se provádí několika způsoby. Ne každý z těchto způsobů lze použít na všechny typy baterií, pro tuhle práci jsou klíčové Li-ion baterie a tudíž nás nejvíce bude zajímat technika počítání náboje.

Ze zjednodušeného vztahu můžeme určit zbývající náboj v baterii.

$$SOC = 1 - \frac{\int Idt}{C_n} \cdot 100 [\%]$$

$C_n$  - Maximální kapacita baterie

Při počítání náboje zvažujeme proud, který proudí do baterie např. při hodinovém nabíjení a odečítáme proud/čas, při odběru energie. Takto jednoduše sestavená rovnice nezahrnuje některé méně, či více důležité vlastnosti baterií a proto nemůžeme stanovit úroveň nabití baterie přesně na procenta. Výrobci stanovují přesnost při použití této metody na 1%, při aplikaci na nové baterii a splnění dalších “laboratorních” podmínek. Při obvyklém používání se její přesnost pohybuje kolem 10%. Bohužel tato metoda nebere v potaz výchozí stav baterie/kumulativní chyby, které jsou způsobeny teplotou/stářím. Pro zahrnutí těchto proměnných je potřeba využít pokročilejších metod počítání SOC.

Další možností odhadu stavu baterie je označována jako *Open circuit voltage* (dále OCV) = *Napětí nezatíženého obvodu*. Tato technika je retrospektivní, kde porovnáme SOC s napětíovou úrovní v obvodu. Klasická OCV se nedá efektivně použít pro odhadování zbývajícího náboje, nicméně při aplikaci rozšířeného Kalmanova filtru se zahrne do výpočtů i SOC. I přesto musí být zavedeny pokročilé vztahy mezi OCV – SOC, aby byla vyloučena chyba způsobená neznámým výchozím nabitím, nestabilitě odporu a kapacitě baterie (změny SOC, teploty, stáří..) [10]

## 5.2 Zdraví baterie – SOH

Označováno, též jako *State of Health* (dále SOH)

V aplikacích, které jsou závislé především na množství dodané energie je SOH obvykle definován jako procentuální poměr mezi aktuálně použitelnou kapacitou  $C_a$  (zjištěnou po kompletním nabití) a nominální kapacitou  $C_n$

$$SOH = \frac{C_a}{C_n} \cdot 100$$

V těchto případech je nejjednodušší metodou provést „kontrolní cyklus“, při kterém je baterie nabita-vybíta a provedení měření za standardních podmínek (teplota, nabíjecí – vybíjecí napětí/proud).

V aplikacích, které vyžadují především výkon baterie (jako jsou např. baterie pro startér) je SOH definován pomocí vnitřního odporu baterie.

$$SOH = \frac{R_{max} - R_a}{R_{max}} \cdot 100$$

Hodnota  $R_{max}$  je maximální tolerovaný vnitřní odpor baterie,  $R_a$  vyjadřuje aktuální hodnotu vnitřního odporu (zjištěnou po kompletním nabití). Metoda stanovení SOH pomocí vnitřního odporu je jednodušší, rychlejší a levnější, než-li první metoda, bohužel je použitelná pouze pro vyjádření SOH v závislosti na výkonu, který je baterie schopna poskytnout.

## 5.3 Životnost baterie– SOL

Občas je životnost nahrazována RUL – Zbývající užitečnou životností (=Remaining useful life)

SOL (*State of Life*) je procentuální vyjádření kondice bateriového článku, kde 100% je ideální stav při opuštění výrobní linky a 0% odpovídá stavu, kdy kapacita baterie nebo výkon nejsou dostačující a baterie musí být nahrazena. Každá baterie podléhá postupné degradaci, kdy klesá kapacita/výkon a roste vnitřní odpor baterie. Měření SOL je důležité především u automobilů a mobilních robotických zařízení, kde je předpoklad pro dlouhodobější používání baterie a tudíž musí být kvůli zpřesnění zahrnut do výpočtů SOL.

Již z názvu můžeme určit vztah mezi RUL a SOL:

$$RUL = 1 - SOL$$

Odhadnutí SOL je poměrně důležitá část z hlediska budoucího vývoje, jelikož na rozdíl od SOH vyjadřuje dlouhodobou kondici baterie (počet cyklů do výrazného zhoršení baterie aj.). V případě budoucího rozmachu EV si můžeme představit modelovou situaci, analogickou se současností:

Mějme prodejnu nových, či ojetých EV. Prodejna bude mít skladem 10 vozů různých dat výroby. V případě, že by nebyla aplikována pokročilá kontrola SOL, ale byl by sledován pouze SOH, tak na základě těchto informací není možno zjistit, jestli prodejce dodržoval doporučení od výrobce a pravidelně nabíjel baterie. V případě, že je prodejce nedodržel, mohla se baterie samovybitím dostat hluboce pod doporučené DOD a tím klesl počet cyklů o X.

## 5.4 Kapacita

Kapacita baterie je obvykle vyjádřena v jednotkách Ah (Ampér – hodiny). Jednotka 1 Ah je definována jako náboj, který článek/baterie dodá spotřebiči při konstantním proudu 1A po dobu 1 hodiny. V případě baterií je možno uvažovat baterii s kapacitou 200Ah, která bude schopna dodávat 20 A po dobu 10h za standardních teplotních podmínek (za standardní podmínky se většinou uvažuje 25°C). [6]

## 5.5 Hloubka vybití – DOD

Hloubka vybití baterie je definována jako:

$$DOD = 1 - SOC$$

Výsledkem je procentuální hodnota, která reprezentuje, kolik energie baterie doručila. U lithiových baterií se nedoporučuje DOD na 100% kvůli negativním dopadům, které by takovéto hluboké vybíjení mělo na baterii. (především zkrácení životnosti).

## 5.6 Násobky kapacity – C-rate

C-rate je poměr, kterým výrobci obvykle udávají optimální vybíjecí/nabíjecí charakteristiku pro daný článek/baterii. Jedná se o velikost nabíjecího/vybíjecího proudu danou násobkem, příp. podílem kapacity baterie. [11]

Např.:

$$I_{max} = C_{rate} \cdot C$$

Mějme baterii RCR123A [12]:

- Nominální napětí : 3,2 V
- Kapacita : 500 mAh
- Maximální proudový odběr : 3C (1,5 A)
- Nejnižší dovolené napětí při vybíjení : 2,0 V
- Standardní dobíjení proudem 250 mA a napětím 3,6 V
- Životnost více jak 500 cyklů nabíjení
- Průměr : 16.5 mm
- Výška : 34 mm
- Váha : 16,5g

V případě, že by výrobce neuvedl v závorce maximální proudový odběr tak dosadíme do vzorce výše:

$$\begin{aligned} I_{max} &= C_{rate} \cdot C \\ I_{max} &= 3 \cdot C \\ I_{max} &= 3 \cdot 0,5 \\ I_{max} &= 1,5A \end{aligned}$$

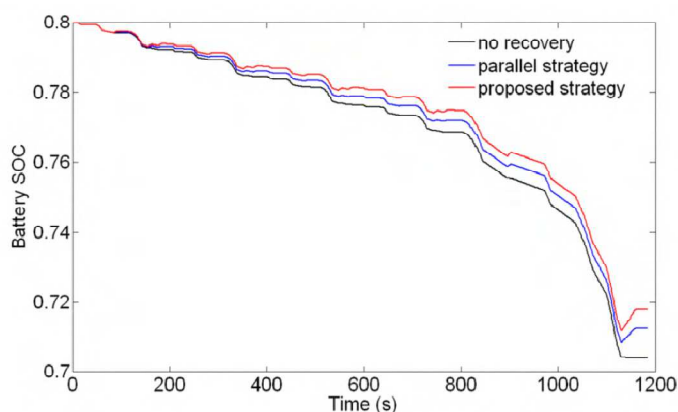
## 5.7 Cyklus

Před použitím baterií v EV byl cyklus baterie jasně definován jako dvojice Vybití-Nabití. Při aplikacích v EV se baterie dobíjí i v průběhu brzdění (regenerativní brzdění). Tahle aplikace tedy vyžaduje změnu definice cyklu, jelikož původní definice není již dostatečně přesná:

„Cyklus je doba po kterou se baterie vybíjí následována dobou nabíjení.“

Při zachování této definice jsou baterie vykresleny v celkem pesimistickém výhledu na jejich životnost.

Proto byly zavedeny modernější definice patří definice cyklu jakožto doby vybíjení s regenerativním brzděním následovanou plným nabitím. Případně množství vybité energie X i s tlumením v podobě regenerativního brzdění (Y) následovanou nabitím stejného množství energie X-Y. (viz obr. níže)



Vybíjecí křivka s regenerativním brzděním; přejato z [13]

## 5.8 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor závisí na spoustě dílčích faktorů a nemůže být brán jako konstanta, i přesto, že spousta výrobců jej udává jako jedinou hodnotu. Vnitřní odpor je závislý na teplotě, SOC, C-rate. Vnitřní odpor je možno spočítat ze spousty různých rovnic, jednou možností je uvažování ohmického odporu článku (reálný zdroj), který se při průchodu proudem baterií projevuje rozdílem motorického napětí a napětí svorkového.

$$R_i = \frac{U_e - U}{I}$$

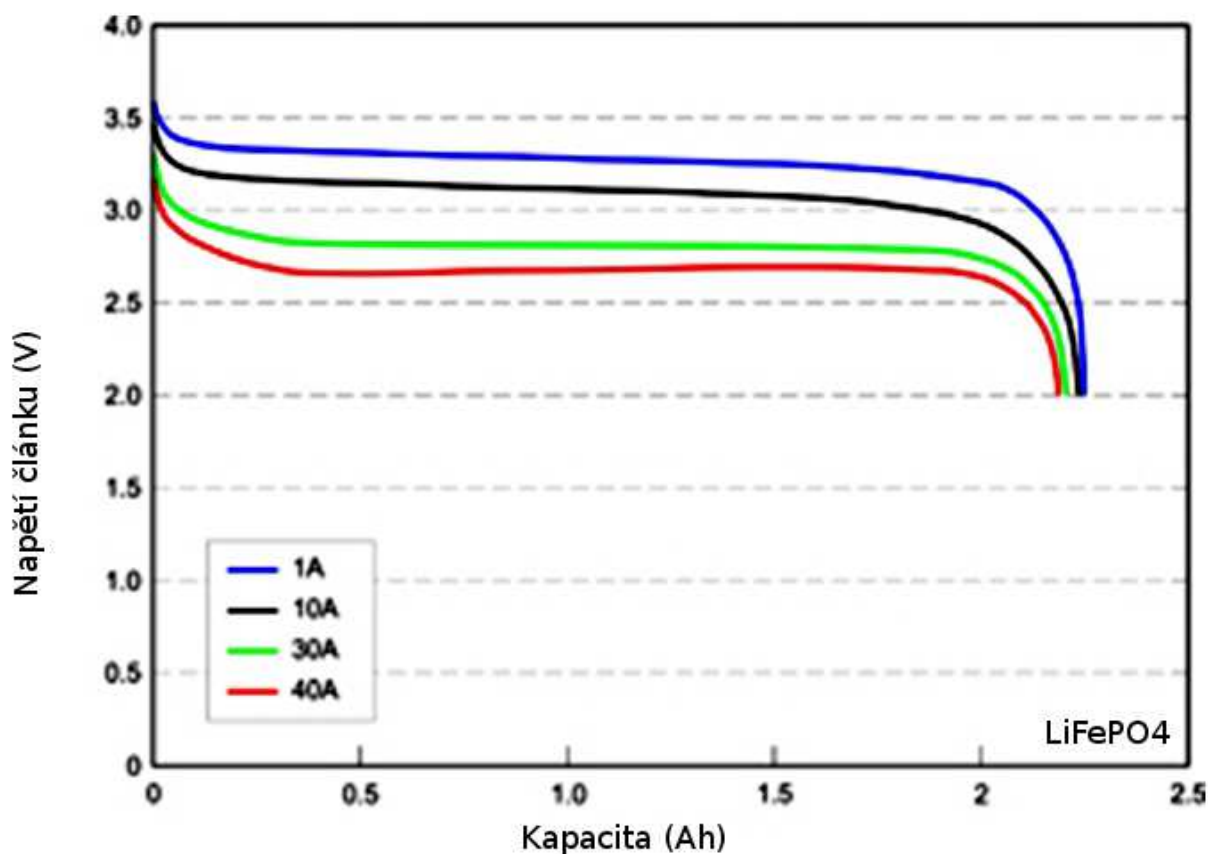


## 6 BALANCOVÁNÍ

Balancování je proces, při kterém se vyrovnává náboj jednotlivých článků baterie, a to se projevuje vyrovnáním napětí jednotlivých článků. Provádí se především kvůli zvýšení použitelné kapacity baterie.

Balancování můžeme dělit dle několika faktorů:

- 1) Jakým způsobem se balancuje
  - a) *Pasivní*: Připojením externího odporu a přeměnou přebytečné energie na teplo.
  - b) *Aktivní*: Převodění nadbytečného náboje do ostatních článků.
- 2) Kdy se balancuje
  - a) Na hranici vybití (spodní hranice)
  - b) Při plném nabití (vrchní hranice)



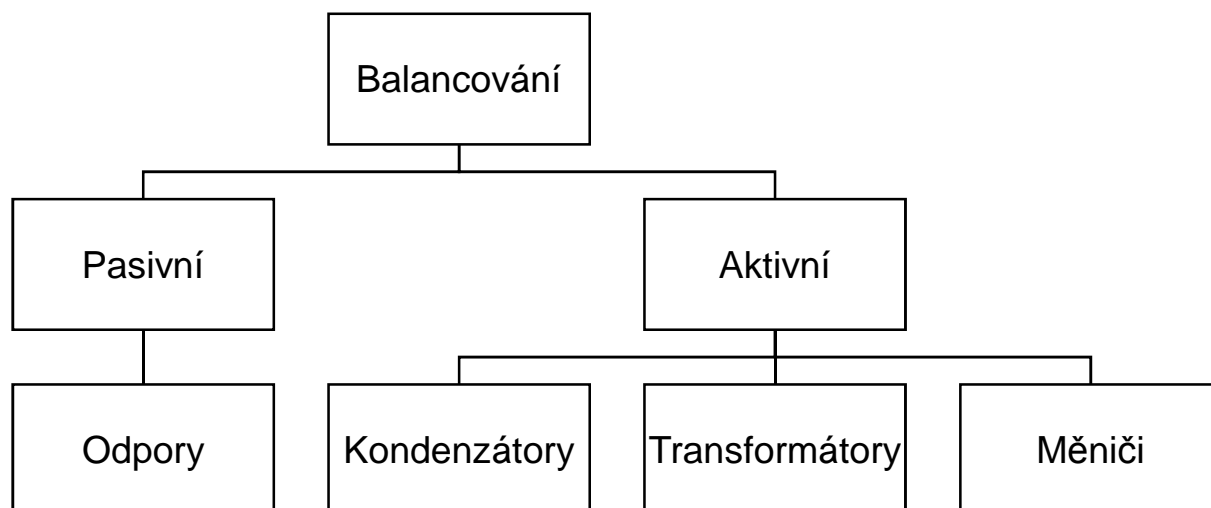
Vybíjecí křivka; přejato z [14].

U článků LiFePO<sub>4</sub> je po většinu vybití velice malý úbytek napětí, proto je obtížné odhadovat SOC z měření napětí a také jsou zde jasně patrná místa pro ideální balancování a těmi jsou začátek a konec pracovního cyklu baterie (protože je zde jasně znatelný pokles/nárůst napětí při přiblížení se ke kritickému bodu článku).

Pro vysvětlení jednotlivých způsobů balancování budeme uvažovat, že se bude balancovat ručně článek po článku.

## 6.1 Způsoby balancování

Balancování se dělí na aktivní a pasivní.



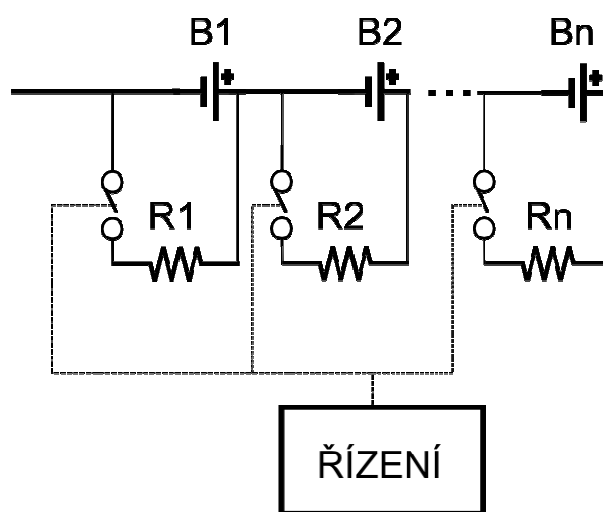
Balancování pasivní se nejčastěji provádí připojením externího odporu na nejvíce nabitý článek a přeměně přebytečné energie na teplo. Aktivní balancování je z hlediska budoucí použitelnosti atraktivnější a to zejména díky tomu, že přebytečná energie není zmařena, nýbrž jsou její pomocí nabity slabší články. Bohužel účinnost těchto metod není 100%, protože dochází ke ztrátám, které se liší dle použité metody.

### 6.1.1 Pasivní metody balancování

Mezi nejrozšířenější pasivní metody spadá připojení rezistorů, které jsou připínány na potřebný článok, který má největší náboj a sníží jeho energii na úroveň ostatních článků. Tento proces se opakuje až do chvíle, kdy všechny články jsou vybalancovány na stejné napětí. Tato metoda je velmi rozšířená jelikož se jedná o nejjednodušší způsob balancování, který je oproti ostatním způsobům velmi levný.

Nevýhody pasivních metod:

- Energie je nevyužita a znehodnocena ve formě tepla
- Může být nezbytné přidat chlazení (kvůli přeměně el. energie na teplo)



*Pasivní balancování rezistorem*

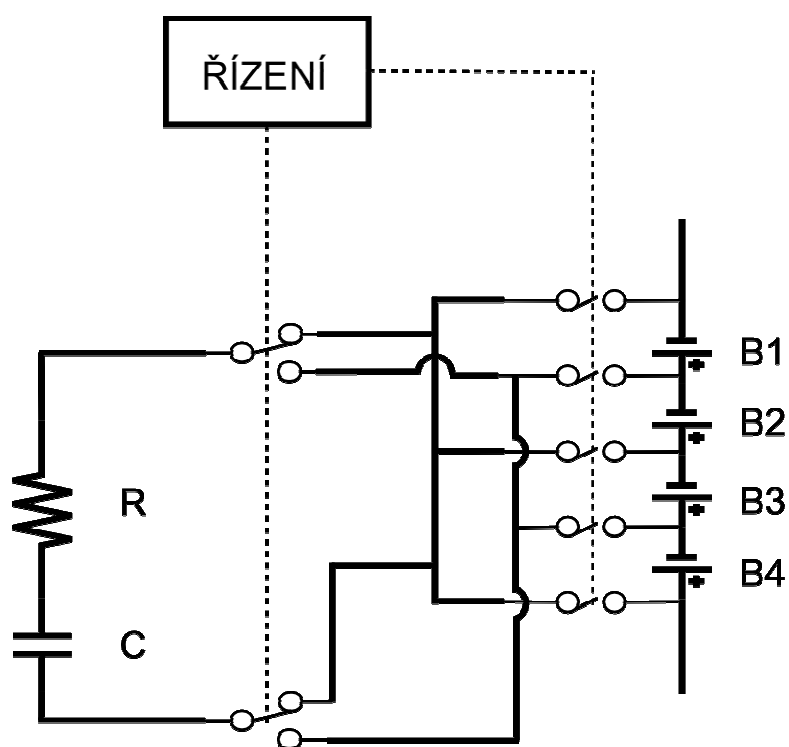
## 6.1.2 Aktivní metody balancování

Aktivní metody si kladou za úkol neplýtvat energií a alespoň částečně využít tuto energii k nabití článků s nižším napětím. Mohou být rozříděny dle zařízení, kterým je docíleno toto nabití do 3 kategorií.

- a) Použit kondenzátor
- b) Použit transformátor
- c) Použit měnič

a) *Aktivní metody s kondenzátory:*

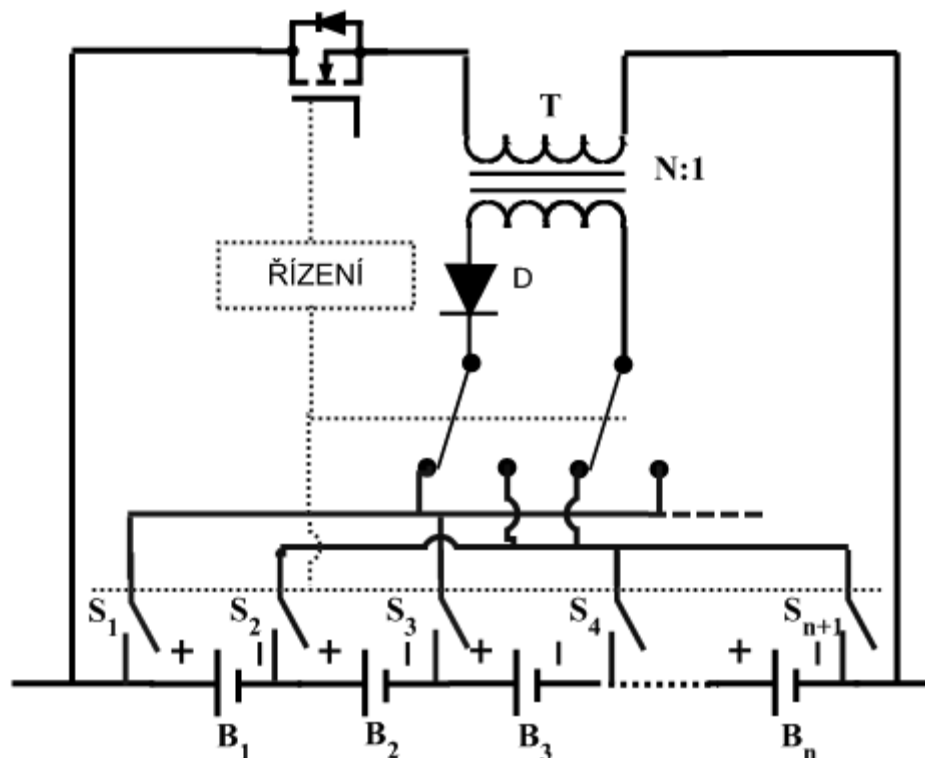
Balancování je dosaženo odvedením přebytečné energie do kondenzátorů a následné spojení kondenzátoru s méně nabitým článkem. Metody, které zahrnují použití kondenzátorů jsou neefektivnější.[15]



*Aktivní balancování kondenzátorem*

### b) Aktivní metody s transformátory:

Jedná se o mnohem rychlejší metodu balancování, než metody zahrnující kondenzátory (řádově 7x). Namísto přenášení malých nábojů dochází k přeměně přebytečné energie z nejvíce nabitého článku na elektromagnetické pole a to se následně přemění zpět na elektrický proud v induktorech méně nabitých článků. [15]



Aktivní balancování transformátorem

## 6.2 Kdy se balancuje

### 6.2.1 Balancování na hranici vybití (Discharge balancing)

Balancování na hraně vybití spočívá v přiblížení se nejslabším článkem na hranici vybití, poté je připojen odpor k jednotlivým ostatním článkům, přebytečná energie je zmařena a úroveň napětí ve všech článcích baterie je vyrovnána.

Ve světě je mnoho zastánců „spodního“ balancování, které zaručí, že se celá baterie dostane na vypínací napětí současně a BMS vypne na základě nízkého napětí všech článků. Teoreticky může být řečeno, že v případě spodního balancování by nemuselo být nutné použít BMS (při zvažování vypnutí pro nepřekročení spodní kritické hranice). Pokud bude použito spodní balancování, může se předpokládat, že celá baterie bude na spodní hranici současně a žádný z článků se nedostane pod kritickou hodnotu.

### 6.2.2 Balancování při plném nabití (Charge balancing)

Balancování při plném nabití není doslovný překlad z anglického výrazu, nicméně pro vysvětlení, kdy k balancování dochází je nejvhodnější. Při nabíjení baterie je nabíjena až do chvíle, než se články přiblíží plné kapacitě, popř. než se jeden článek dostane na mezní hodnotu. V téhle chvíli je nutno vybalancovat ostatní články baterie na stejnou hodnotu a při nabíjení bude nejvhodnější zvolit techniku individuálního dobíjení článků.



## 7 TOPOLOGIE BMS

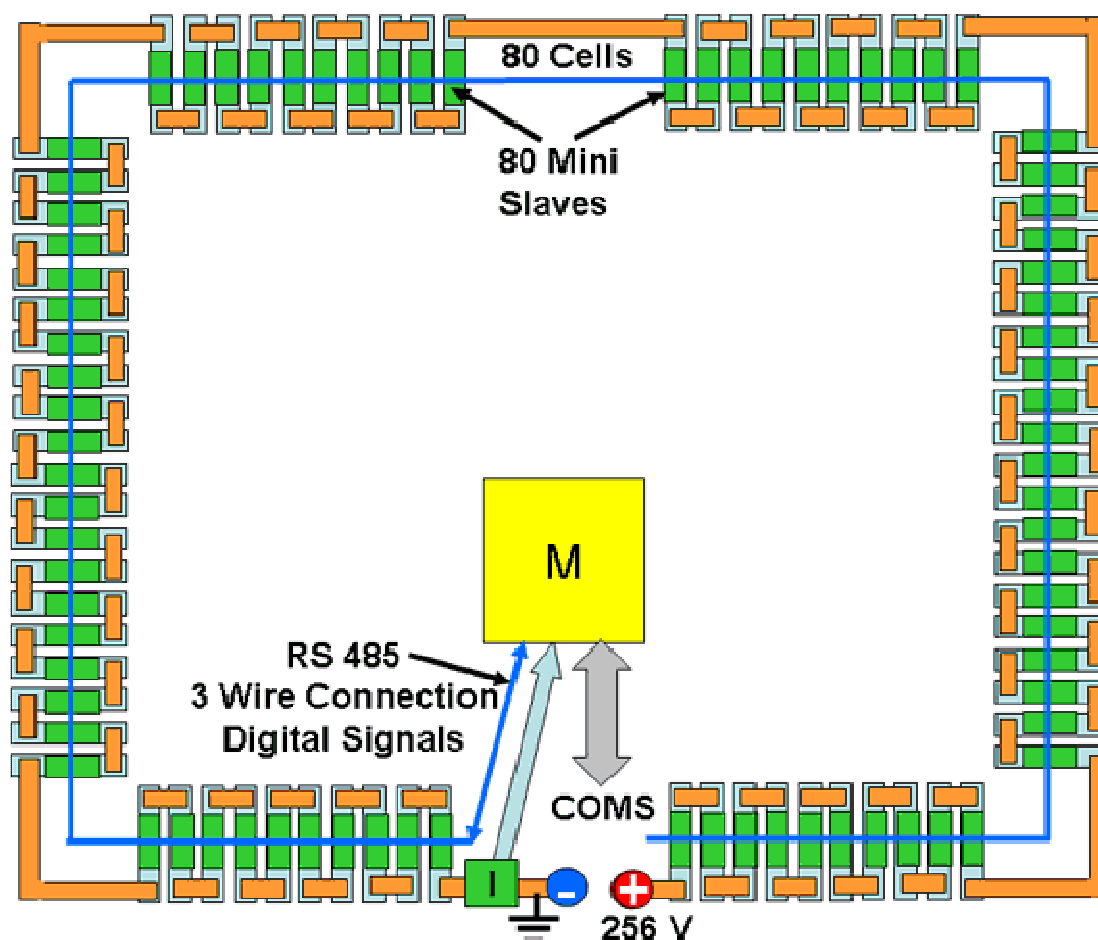
Výkonnost jednotlivých BMS, jež jsou na trhu, se liší ať již díky použití rozdílných způsobů balancování, jinak naprogramovanému modelu baterie anebo právě kvůli rozdílnému zapojení hardwarové části BMS (*topologii systému*).

Dle topologie zapojení se BMS rozdělují do těchto skupin [16]:

- Distribuované
- Modulové
- Centralizované

*Distribuované:*

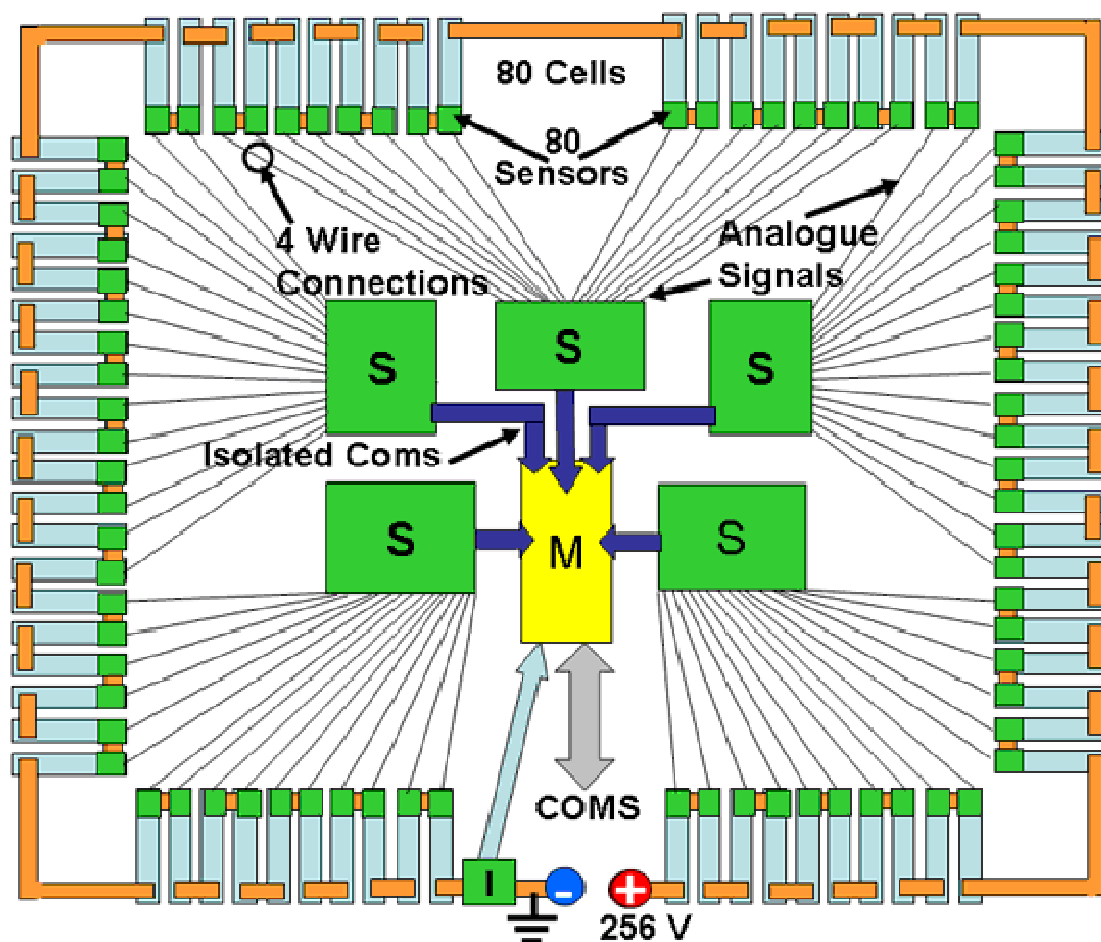
V distribuované topologii jsou na všech člancích baterie rozmístěny dílčí řídicí jednotky, které jsou v režimu slave (*mini-slave jednotky*). Tyto jednotky monitorují parametry jednotlivých článků baterie a posílají data hlavní řídicí jednotce (*Master*). Obvykle se pro toto zapojení využívá sběrnice CAN (více o CAN v kapitole 9). Názorné distribuované zapojení je možno vidět na obr. X. Mezi výhody tohoto zapojení patří především jednoduchý návrh a konstrukce zařízení. Nevýhodou je zejména velké množství *mini-slave jednotek*.



*Distribuovaná topologie; přejato [16]*

*Modulové:*

V případě modulového zapojení je baterie rozdělena do modulů po několika článcích (obvykle se množství článků pohybuje mezi 8 – 12). Tato topologie má jednu *Master řídicí jednotku*, která kontroluje moduly (zapojené jako *slave*). Master řídicí jednotka má na starosti všechny ostatní moduly, řízení aktivního balancování, měření a komunikaci s UI. Při modulové topologii dochází k C2C balancování (*Cell to Cell*), kde se aktivně balancují články, které spolu sousedí. Mezi výhody patří možnost snadného rozšíření baterie (přidáním dalšího modulu) a možnost zpracování vysokých proudů. Komunikace obvykle probíhá pomocí I2C sběrnice. Jelikož komunikace mezi řídicí jednotkou a moduly probíhá analogovými signály tak je poměrně náchylná k rušení.



*Modulová topologie; přejato [16]*

*Centralizované:*

Při centralizované topologii je každý článek připojen napřímo k řídicí jednotce a proto v porovnání s ostatními topologiemi je zde použito největší množství vodičů. Vzhledem k poměrně komplikovanému zapojení je budoucí rozšíření systému relativně náročná činnost.



## 8 VNITŘNÍ KOMUNIKACE SYSTÉMU

Komunikace uvnitř systému se odvíjí dle topologie systému.

Standardně se využívají přenosy:

- analogovými signály
- sériovým rozhraním (SPI)
- I2C sběrnici
- Bezdrátovou komunikací
- CAN sběrnici

V této práci bude uvedeno použití SPI, I2C a CAN sběrnice.

### 8.1 SPI – Serial Peripheral Interface

Sběrnice SPI je 3 vodičové, full duplex spojení se synchronním datovým přenosem. Tento typ sběrnice se používá převážně pro přímé spojení jednotlivých mikroprocesorů. Původně byla sběrnice navržena pro přímou komunikaci *MASTER – SLAVE*, ale je schopna zapojení více zařízení v režimu *MASTER – SLAVE* (jedno master zařízení, více slave).

Dle SPI standardu jsou piny označeny následovně:

SCLK – (Seriál Clock) přenos hodinového signálu

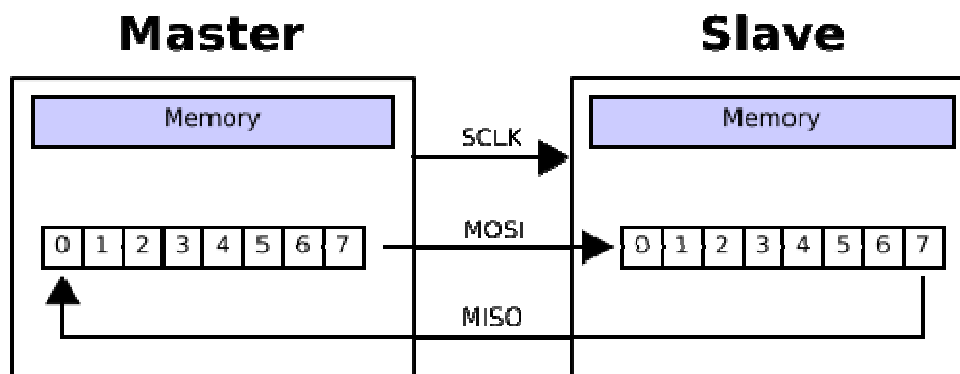
MOSI – (Master Out Slave In) Komunikace z master zařízení směrem do slave zařízení

MISO – (Master In Slave Out) Komunikace ze slave zařízení směrem do master zařízení

SS – (Slave Select) Výběr zařízení ke komunikaci, někdy bývá nahrazeno CS (Chip Select)

Zařízení obvykle fungují jako posuvné registry, kde pro zahájení komunikace musí master nakonfigurovat časování a přenesení logickou 0 přes SS vodič do vybraného slave zařízení.

Během každého časového cyklu probíhá full-duplexová výměna dat, kde master pošle bit po MOSI vodiči, slave ho přečte dále slave pošle bit po MISO vodiči a master ho přečte. Při komunikaci může *master* komunikovat s pouze a výhradně jedním *slave* zařízením. [17]

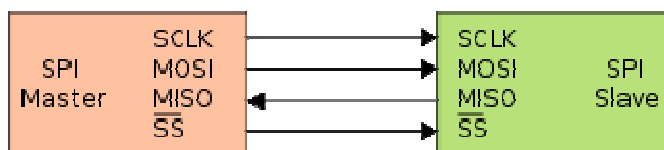


Komunikace SPI; přejato z [17]

### 8.1.1 Fyzická vrstva

Jednotlivé zařízení jsou jednoduše propojeny 4 vodiči, které jsou zapojeny do výše zmíněných pinů následovně:

- Datový výstup MOSI zařízení Master je propojen s datovými vstupy MOSI všech zařízení Slave
- Datový vstup MISO zařízení Master je propojen s datovými výstupy MISO všech zařízení Slave
- Výstup hodinového signálu SCLK je připojen na vstupy SCLK všech zařízení Slave
- Každé zařízení Slave má vstup SS, který je připojen k právě jednomu pinu na zařízení Master.

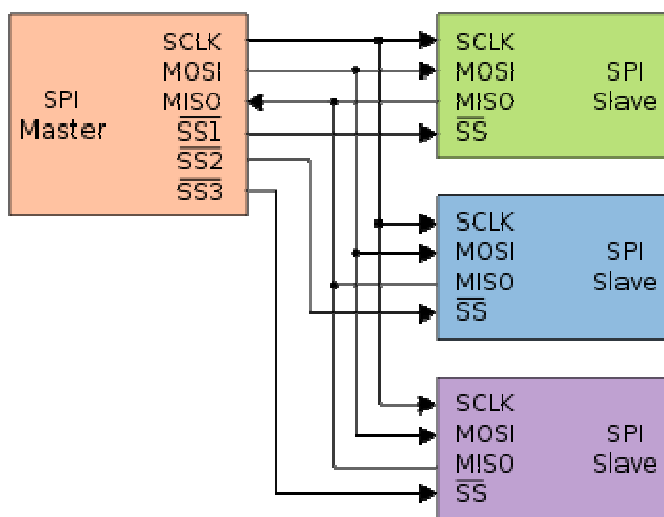


*Zapojení 1:1 (Master:Slave); přejato z [17]*

Pro použití více *slave* zařízení jsou 2 možnosti zapojení:

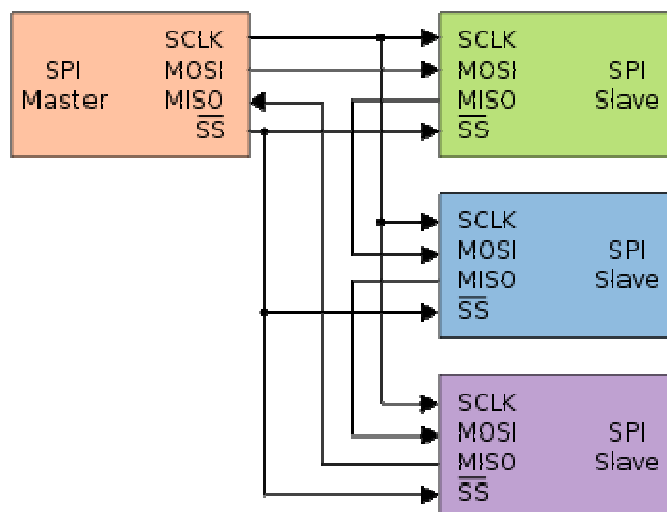
- Použití více čipů
- Zapojení do kruhu

Při použití více čipů jsou propojeny všechny Slave zařízení s jednotlivými čipy přes piny SS (Slave select). Když je vybráno jedno Slave zařízení, datový výstup ostatních zařízení přechází do stavu vysoké impedance a nezkruskuje data vybraného zařízení.



*Zapojení 1:n (Master:Slave); přejato z [17]*

Při zapojení do kruhu („Daisy chain“) jsou veškerá data posílána do následujícího zařízení. Data z master zařízení jsou poslána do prvního zařízení slave a ty jsou postupně dále předávána. Slave zařízení bývají obvykle nastaveny tak, aby každý druhý časový úsek poslaly data, která získaly v prvním časovém úseku. Celé zapojení do kruhu tedy pracuje jako posuvný registr. Proto je důležité správné časování a získávání správných čísel bitů. To je často ošetřeno komplexnějším softwarovým řešením.



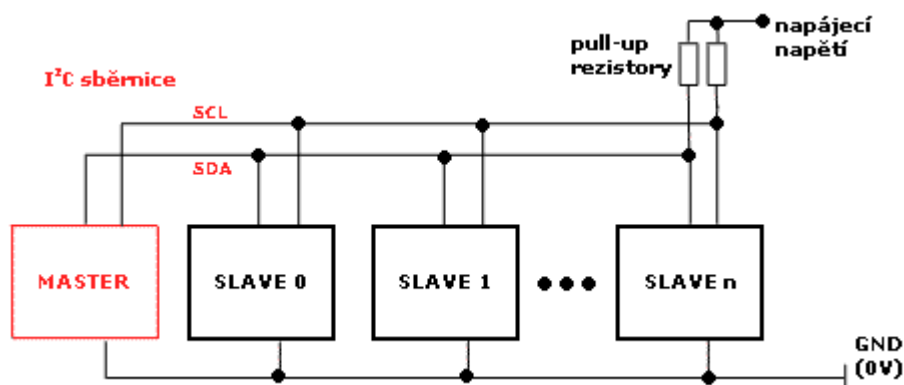
*Zapojení do kruhu 1:n (Daisy chain); přejato z [17]*

## 8.2 I2C-BUS

Sběrnice I2C byla vyvinuta firmou Philips v roce 1982 jako jednoduchý prostředek k interní komunikaci systémů pro řízení budov. I2C je synchronní half-duplex interní datová sběrnice, která slouží k přenosu dat a ke komunikaci mezi integrovanými obvody v rámci většího zařízení. V případě I2C není k určení slave zařízení určen speciální vodič, ale v rámci datového rámce je zahrnuta adresace cílového zařízení. Tato adresa je v základní verzi protokolu 7bitová (v rozšířené 10 bitů).

## 8.2.1 Fyzická vrstva

I<sup>2</sup>C sběrnice je tvořena dvojicí vodičů, vodičem pro přenos hodinového signálu SCL (mnohdy označováno SCK) a datovým vodičem SDA. V praxi se k zmíněným základním vodičům přidává ještě společný zemnicí vodič. Oba tyto vodiče jsou ještě připojeny přes pull-up rezistory (cca 1,5 k $\Omega$ ) na napájecí napětí.



Fyzická vrstva I<sup>2</sup>C; přejato z [19]

Po dobu nečinnosti je na obou vodičích hodnota logické 1 (*klidový stav*). Pull-up rezistory se připojují kvůli okamžikům, kdy jsou všechny uzly nečinné (mohou být i odpojeny od sběrnice), kde zvyšují napětí na obou signálových vodičích na logickou 1.

## 8.2.2 Princip přenosu

O veškeré řízení sběrnice se stará jedno zařízení nakonfigurované jako *master*, obvody se dají zapojit i jako multi-master, kde několik zařízení nastavených jako master, vzhledem k povaze a zaměření práce bude zmíněna pouze situace s jedním master zařízením. Master zařízení generuje na hodinovém vodiči signál při každém přenosu. Když jedno zařízení vysílá, přijímají zprávu všechna zařízení na sběrnici a podle adresy určí, jestli jsou data určena právě pro ně. Zařízení, které požaduje odeslání/přijetí dat musí specifikovat s kterým zařízením chce komunikovat a uvést, zda-li půjde o přijímání, nebo vysílání (čtení/zápis).

V *klidovém stavu* jsou oba vodiče v případě log. 1. Při probíhající komunikaci jsou na vodič SDA vysílány jednotlivé bity, kdy platí pravidlo, že logická úroveň na SDA se smí měnit pouze při SCL v log. 0. Toto pravidlo má 2 výjimky a těmi jsou *START* a *STOP* bity. Tyto bity se používají k zahájení a ukončení přenosu. (viz. obr. níže)

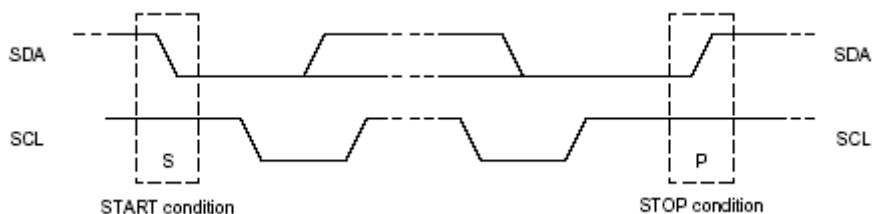
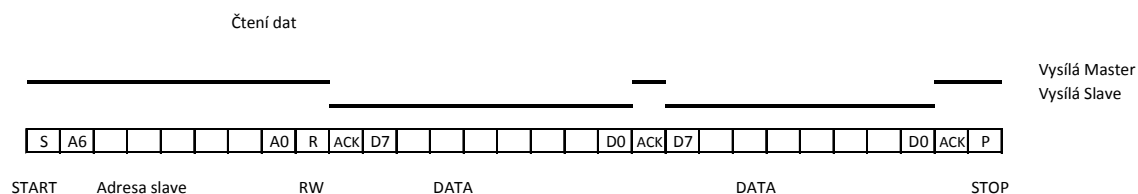
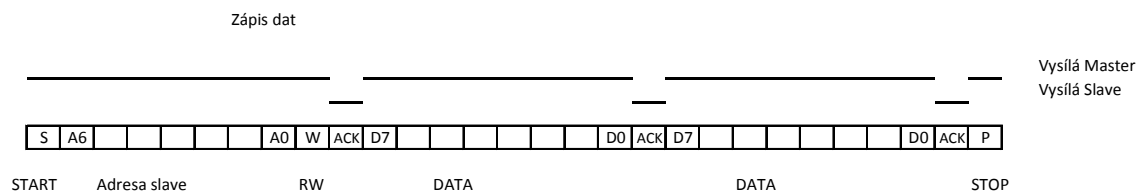


Schéma komunikace; přejato z [20]

### 8.2.3 Linková vrstva

Každému rámcí předchází vysílání *start* bitu, poté 7 bitová adresa příjemce a 1 bit *R/W*. Další byt *ACK* (*acknowledgement* – potvrzení) posílá příjemce zprávy jako potvrzení, že je na příjmu. Dále jsou data přenášena dle směru určeného *R/W* bitem. Každý byte je následován potvrzovacím *ACK* bitem. Po ukončení přenosu je odvysílán *stop* bit.

[18]





## 9 KOMUNIKACE S NADRÍZENÝMI SYSTÉMY

### 9.1 Sběrnice CAN

*Controller Area Network* (CAN) je sériový komunikační protokol vytvořen firmou Bosh pro využití v automobilech. Mezi jeho přednosti patří nízká cena, snadné zavedení, vysoká přenosová rychlost a snadná rozšiřitelnost. Sběrnice CAN dříve používala modifikované rozhraní RS 485, později bylo definováno normou ISO 11898. V této normě je v specifikována fyzická a linková vrstva protokolu.

#### 9.1.1 Koncepce CAN

CAN je sběrnici typu multi-master, kde jednotlivé stanice připojené ke sběrnici vysílají svá data, aniž by braly v potaz, jestli je v systému „zájemce“. Datové rámce proto neobsahují adresaci příjemce, ale identifikaci jaká data jsou v rámci obsažena. Rámec je přijat všemi přijímači na sběrnici a každý z přijímačů vyhodnotí na základě informací obsažených v popisu rámce, jestli bude právě přijatý rámec zpracován, nebo smazán. Každý z přijímačů tak akceptuje pouze datové rámce, které daná stanice potřebuje.

#### 9.1.2 Fyzická vrstva CAN

Základní požadavek na přenosové medium protokolu CAN je, aby realizovalo funkci logického součinu. Je vhodné, aby spoj byl symetrický, tím bude zvýšena rychlost přenosu a odolnost proti rušení. Sběrnici tvoří 2 vodiče (označovány CAN\_H a CAN\_L), které jsou ukončeny zakončovacími rezistory 120Ω. K takto definované sběrnici se připojují komunikační uzly viz obr. níže.[22]

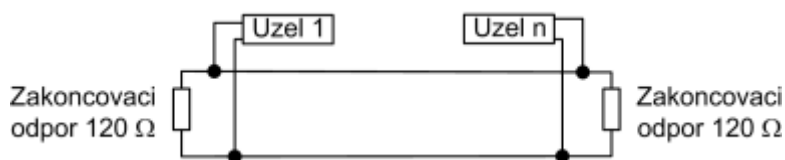


Schéma CAN sběrnice; přejato z [22]

Sběrnice přenáší 2 stavy *aktivní* (dominantní – dominant) a *pasivní* (recesivní – recessive), kde *dominantní* stav reprezentuje logickou hodnotu 1, *recesivní* hodnotu 0. Sběrnice je v dominantním stavu pokud alespoň jeden její uzel je v dominantním stavu. Jednotlivé stavy jsou určeny rozdílnými napětími vodičů. Dle normy je pro *recesivní stav* velikost rozdílového napětí  $V_{diff} = 0V$  a pro *dominantní stav*  $V_{diff} = 2V$ . S ohledem na zatížení sběrnice je k ní možno připojit cca 64 uzlů na segment. Přenosová rychlost sběrnice 1Mbit/s je dosažitelná pouze na krátké vzdálenosti (do 40m) a se vzdáleností prudce klesá. Při vzdálenosti 1,2km se jedná o přenosovou rychlost 70 kbitů/s.

#### 9.1.3 Linková vrstva CAN

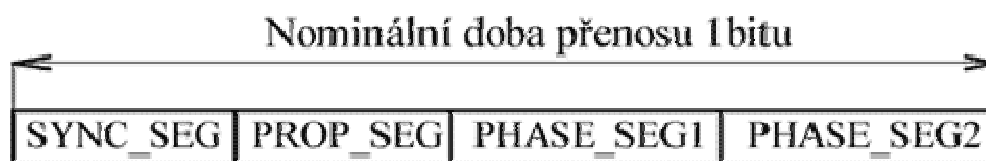
Linková vrstva protokolu CAN je rozdělena stejně jako v modelu *ISO/OSI* na podvrstvi *LLC* a *MAC*.

*MAC* (*Medium Access Control*) je jádrem protokolu CAN, jeho úkolem je kódovat data, vkládat do komunikace doplňkové bity, řídit přístup všech uzlů k médiu, rozlišovat prioritu zpráv, detekovat chyby a jejich hlášení a potvrzování správně přijatých zpráv.

*LLC* (*Logical Link Control*) je podvrstva řídicí datový spoj. V případě sběrnice CAN to znamená filtrování přijatých zpráv (*acceptance filtering*) a hlášení o přetíženích (*overload notification*). [23]

### 9.1.4 Synchronizace uzlů CAN

Aby zůstaly všechny uzly na sběrnici synchronní, používají se změny úrovně signálu. Doba trvání jednoho informačního bitu se dělí na 4 časové segmenty (obr. níže). Každý segment se dělí na časová kvanta. Během *SYNC\_SEG* se očekává hrana signálu, segmentem *PROP\_SEG* se kompenzuje doba šíření signálu po sběrnici. Mezi segmenty *PHASE\_SEG1* a *PHASE\_SEG2* se nachází vzorkovací bod stavu sběrnice a využívají se ke kompenzaci fázových chyb na sběrnici. Je-li očekávána hrana mimo *SYNC\_SEG* mění se jejich délka o programovatelný počet časových kvant. Aby tento způsob kompenzace nezměnil obsah zpráv, používá se metoda doplnění bitů s opačnou polaritou. Obsahuje-li zpráva 5 bitů se stejnou polaritou, automaticky se do řetězce zařadí bit s opačnou polaritou, který se na přijímané straně opět vyřadí. [23]



*Doba přenosu bitu; přejato z [23]*



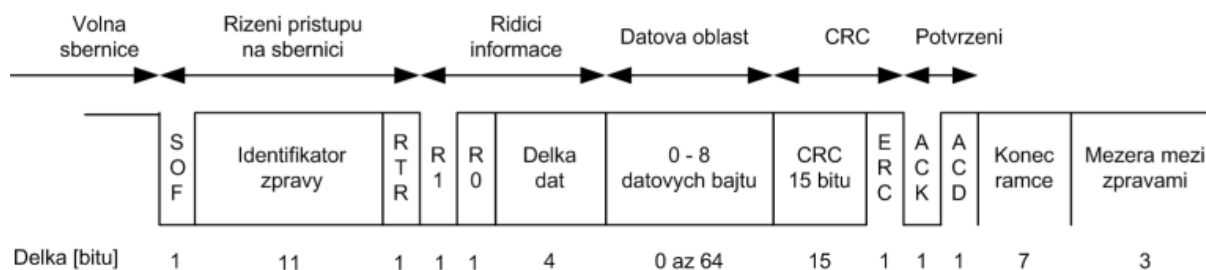
## 9.1.5 Datové rámce protokolu CAN

Zprávy jsou při protokolu CAN předávány v *rámčích (frames)*, kde v definici protokolu jsou určeny 4 základní typy:

- Datový rámeček (*Data frame*)
- Žádost o data (*Remote frame*)
- Chybový rámeček (*Error frame*)
- Rámeček přetížení (*Overload frame*)

*Datový rámeček:*

Protokol CAN používá 2 formáty zpráv *Standardní formát (definován CAN 2.0A)* a *Rozšířený formát (definován CAN 2.0B)*. Jediný rozdíl mezi těmito formáty je rozšíření identifikátoru zprávy v *CAN 2.0B* na 29 bitů (oproti původním 11ti). V případě použití řadiče podporujícího *CAN 2.0B*, mohou být na sběrnici současně posílány standardní i rozšířené formáty rámečků.



*Datový rámeček specifikace CAN 2.0A, přejato z [23]*

Vysílání datové zprávy je možné pouze pokud je volná sběrnice (*stav Bus Free*). Jakmile má uzel připravenou zprávu k vysílání a detekuje volnou sběrnici, začíná vysílat. V případě obsazené sběrnice vyčkává na její uvolnění a zprávu odvysílá poté.

*Význam částí datového rámečku:*

- začátek rámečku (1b) *SOF - Start of Frame*
- řízení přístupu ke sběrnici a identifikátor zprávy (*Arbitration Field*), (11b), určuje prioritu zprávy a význam přenášené zprávy
- *RTR (Remote Request)* - (1b), slouží k rozlišení zprávy zda-li jde o datovou zprávu (dominant) nebo žádost o přístup ke sběrnici (recessive)
- řídicí pole (*Control Field*), R0 a R1 celkem 2b, rezervováno
- délka datové zprávy (4b)
- datová oblast (*Data Field*) - max. 8Byte dat
- *CRC* - zabezpečovací kód (15b)
- *ERC* - (1b) dominant, *CRC* oddělovač
- potvrzení *ACK* - (2b), z toho 1b (*ACK*), 1b oddělovač (*ACD*) - recessive
- konec zprávy (*End of Frame*) - (7b) recessive
- mezera mezi zprávami (*Interframe Space*) - (3b) recessive



## 10 ZÁVĚR

Tato práce je rešeršní studie BMS systémů nutných pro spolehlivý provoz vozidel s elektrickou trakcí. BMS systémy jsou komplexní oblast, kde pro tvorbu a zlepšování jsou zapotřebí komplexní znalosti několika oborů. Kloubí se zde *chemie* bateriových článků, *matematika-fyzika* při popisování chování baterie matematickým modelem, *elektrotechnika* při navrhování topologie/balančního mechanismu a *informatika* při naprogramování veškerého řízení/komunikace. V práci byla shrnuta nejdůležitější fakta ze všech těchto oblastí a po zhodnocení všech faktů usuzuji, že stanovení přesného matematicko-fyzikálního modelu a jeho testování na reálných bateriích je v současné době část, která by byla vhodná pro hlubší zkoumání. Jako největší slabinu současných modelů vidím absenci pokročilého algoritmu určujícího *životnost baterie (State of Life)*.

## 11 ZDROJE

- [1] [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: [http://www.iea.org/publications/globalevoutlook\\_2013.pdf](http://www.iea.org/publications/globalevoutlook_2013.pdf)
- [2] DUBARRY, Matthieu, Nicolas VUILLAUME a Bor Yann LIAW. Origins and accommodation of cell variations in Li-ion battery pack modeling. *International Journal of Energy Research*. 2010, vol. 34, issue 2, s. 216-231. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/er.1668>.
- [3] [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://gw1-power.tumblr.com/post/576978080/faq-initial-charging-information-the-above-is>
- [4][online].[cit.2014-05-29].Dostupné z:[http://www.artc.org.tw/english/02\\_research/02\\_01detail.aspx?pdid=32](http://www.artc.org.tw/english/02_research/02_01detail.aspx?pdid=32)
- [5][online].[cit.2014-05-29].Dostupné z:[http://batteryuniversity.com/learn/article/serial\\_and\\_parallel\\_battery\\_configurations](http://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations)
- [6] FISK, Heidi a JOHAN LEIJGÅRD. *Master of science thesis: A Battery Management Unit* [online]. 2010. vyd. Chalmers University of Technology, University of Gothenburg, Department of Computer Science and Engineering, Göteborg, Sweden [cit. 2014-05-29].
- [7][online].[cit.2014-05-29].Dostupné.z: [http://nuclearpowertraining.tpub.com/hdbk1084/css/hdbk1084\\_41.htm](http://nuclearpowertraining.tpub.com/hdbk1084/css/hdbk1084_41.htm)
- [8] *Electropedia* [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/chargers.htm>
- [9] Industrial chargers. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf/ACD4000/ACD4000PE4.pdf>
- [10] POP, Valer. *Battery management systems: accurate state-of-charge indication for battery powered applications*. Dordrecht: Springer, 2008, xx, 223 p. ISBN 9781402069451-.
- [11]*Engineer's edge*[online].[cit.2014-05-29].Dostupné.z: [http://www.engineersedge.com/battery/capacity\\_battery\\_ratings.htm](http://www.engineersedge.com/battery/capacity_battery_ratings.htm)
- [12] *Kronium* [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: [http://www.kronium.cz/dobijeci-baterie-aw-rcr123a/16340-lifepo4/prod\\_57.html](http://www.kronium.cz/dobijeci-baterie-aw-rcr123a/16340-lifepo4/prod_57.html) 6.5.2014
- [13] SOCIETY], Sponsored by the IEEE Intelligent Transportation Systems. *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE*. Piscataway: I E E E, 2009, s. 864-868. ISBN 9781424435036.
- [14][online].[cit.2014-05-29].Dostupné.z:<http://blog.cafefoundation.org/wp-content/uploads/2010/10/typical-lifepo4-discharge-curve.jpg>
- [15] *IEEE VPPC 2011 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference: 6-9 Sept. 2011, Chicago, Illinois*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2011. ISBN 978-161-2842-462.
- [16] BMS systems. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/bms.htm#bms>
- [17] SPI Interface. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.best-microcontroller-projects.com/spi-interface.html>

[18]SPI\_Bus.[online].[cit.2014-05-29].Dostupné.z:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface\\_Bus](http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus)

[19] I2C. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/iic.htm>

[20] Stručný popis I2C sběrnice a její použití. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z:  
<http://www.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>

[21] [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.8051projects.net/i2c-twi-tutorial/write-read-i2c-bus.php>

[22]Sběrnice\_CAN.[online].[cit.2014-05-29].Dostupné.z:  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/03021/index.html>

[23]Sběrnice\_CAN-návrh obvodu.[online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/aplikovani-sbernice-can.html>



## **PŘÍLOHY**

Součástí této práce je CD obsahující:

Bakalářská práce ve formátu Adobe Acrobat (PDF)