

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Základní technologie baterií a jejich ekonomické zhodnocení

Vojtěch Matouš

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D

Obor: Elektrotechnika a management

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Květen 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Matouš** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **409087**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Základní technologie baterií a jejich ekonomické zhodnocení

Název bakalářské práce anglicky:

The basic battery technology and their economic evaluation

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte vhodnou skupinu ekonomických ukazatelů pro zhodnocení baterií jako prostředků pro ukládání elektrické energie pro potřeby elektromobility a užití v domácnostech.
2. Vyčíslete ekonomické ukazatele definované v předchozím bodu zadání pro vybrané typy akumulátorových baterií. Vyčíslení proveďte na základě dostupných dat v různých časových obdobích.
3. Z vyčíslených ukazatelů sestrojte historické a současné trendy, a pokuste se predikovat vývoj do budoucna.
4. Na základě zjištěných údajů doporučte budoucí strategie výběru baterií pro použití v elektromobilech a domácnostech.

Seznam doporučené literatury:

1. REDDY, Thomas B a David LINDEN. Linden's handbook of batteries. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 9780071624213.
2. DIORIO, Nicholas, Aron DOBOS a Steven JANZOU. Economic Analysis Case Studies of Battery Energy Storage with SAM [online]. National Renewable Energy Laboratory, , 22 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: www.nrel.gov/docs/fy16osti/64987.pdf
3. FITZGERALD, Garrett, James MANDEL, Jesse MORRIS a Hervé TOUAT. The Economics of Battery Energy Storage [online]. Rocky Mountain Institute, , 44 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: http://www.rmi.org/electricity_battery_value

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Hrzina Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **27.05.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji ČVUT, že mi je tak dobrou *alma mater*. Dále děkuji svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D, za pomoc a vedení při práci, a také panu Ing. Miroslavu Vítkovi, CSc. a doc. Ing. Jirímu Vašíčkovi, CSc. za odborné konzultace.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 15. května 2017

Abstrakt

Cílem této práce je sestavit vhodné ekonomické ukazatele, které jednoduše popisují vlastnosti vybraných bateriových technologií. Dalším cílem je porovnat tyto ukazatele v různých časových obdobích a pokusit se predikovat budoucí cenu bateriových článků.

Jako ekonomické ukazatele jsem zvolil ohodnocené technické parametry bateriových článků a vážený průměr z těchto ukazatelů. Ten vznikl za pomoci expertního šetření. Pro lepší čitelnost jsem ekonomické ukazatele graficky interpretoval podle dostupných dat v různých časových obdobích. Dále jsem u vybraných technologií sestavil trendy energetické hustoty a trendy a predikce cen za kWh bateriových článků. Predikci jsem založil na uvažování prvního principu. Nakonec jsem shrnul použité postupy pro vytvoření budoucích strategií výběru baterií.

Klíčová slova: technologie bateriových článků, parametry bateriových článků, evaluace parametrů, grafické znázornění evaluace parametrů, porovnání evaluace parametrů v různých časových obdobích, trendy a predikce cen bateriových článků, trendy energetické hustoty, strategie výběru bateriových článků

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D
Katedra elektrotechnologie,
Technická 2,
Praha 6

Abstract

The purpose of this work is to devise proper economic indicators that in a simple way interpret the features of the chosen battery technologies. Further purpose is to compare these indicators in different time periods and to try to predict the future cost of battery cells.

As the economic indicators I have decided to use the evaluated technical parameters of battery cells and the weighted average from these indicators. This weighted average is based on the expert survey results. For more intuitive interpretation, I have, when possible, graphically interpreted these economic indicators in different time periods. Furthermore I have created trends of both price per kWh and energy density and the price prediction per kWh of battery cells of the chosen technologies. The prediction is based on the first principle thinking. In the end I have summarized the approaches for future battery preference strategies.

Keywords: technology of battery cells, parameters of battery cells, graphical interpretation of evaluated parameters, comparison of evaluated parameters in different time periods, trends and prediction of battery cells price, trends of energy density, battery preference strategies

Title translation: The basic battery technology and their economic evaluation

Obsah

1 Úvod	1		
2 Kategorizace typů bateriových článků	3		
2.1 Charakteristika baterií	3		
2.1.1 Tabulková charakteristika baterií	3		
2.1.2 Grafické znázornění charakteristiky baterií	8		
3 Ekonomické ukazatele	13		
3.1 Získání a analýza dat	13		
3.2 Takulky ohodnocených parametrů ekonomických ukazatelů	14		
3.2.1 Metodologie hodnocení jednotlivých parametrů	14		
3.2.2 Tabulka ekonomických ukazatelů pro rok 2015	15		
3.3 Grafická charakteristika baterií z obrázku 3.1	18		
3.3.1 Cena baterií za kWh vs. cena baterií za kWh na cyklus (DoD 80%)	18		
3.3.2 Celkové ohodnocení	19		
3.3.3 Olověná technologie (Pb, lead - acid)	19		
3.3.4 Nikl technologie	20		
3.3.5 Lithiová technologie	21		
3.3.6 VRB (Vanadium redox)	25		
3.4 Tabulka ekonomických parametrů pro jednotlivé roky	26		
3.4.1 Lithiová technologie	26		
3.4.2 Olověná technologie	27		
3.4.3 NiMH technologie	28		
3.4.4 Vážený průměr pro elektromobily	28		
3.4.5 Vážený průměr pro stacionární úložiště	29		
4 Trendy a predikce	31		
4.0.1 Trendy	31		
4.0.2 NiMH technologie	34		
4.0.3 Predikce vývoje cen lithiové technologie	35		

5 Strategie výběru baterií	41
5.1 Výchozí bod	41
5.2 Model budoucích strategií....	41
6 Závěr	45
A Literatura	47

Obrázky

2.1 Zde vidíme kategorizaci bateriové technologie z technického hlediska. * Platí pro otevřenou Pb, uzavřená Pb baterie by měla hodnotu spíše střední. ** Odpovídá přetížení svazku, není v C - rate..	5	3.1 Tento obrázek znázorňuje ohodnocené parametry (ekonomické ukazatele) baterií z obrázku 2.1 a 3.14 k roku 2015. Každému parametru je přiřazena hodnota mezi 0 a 5, kdy 5 znamená nejlepší hodnocení a 0 znamená hodnocení nejhorší. * 0 je zde uměle doplněna. VRB je totiž velice nevhodná k použití v elektromobilech.	17
2.2 Znázornění rozpětí energetické hustoty [Wh/kg] různých technologií bateriových článků pro rok 2015.	8	3.2 Porovnání ceny baterií podle obrázku 3.1 (tedy čím vyšší číslo na stupnici od 1 do 5, tím lepší) pro [ceny/kWh] a [cenu/kWh/cyklus (DoD 80%)].	18
2.3 Graf porovnání bateriových technologií z pohledu počtu cyklů při 80 % DoD. Až na VRB a LTO je zde znázorněna horní mez (tedy nejlepší možné skóre při současné úrovni technologie.)	9	3.3 Celkové porovnání jednotlivých technologií na základě vážených průměrů.	19
2.4 Graf porovnání bateriových technologií z pohledu počtu cyklů při 80 % DoD; pro lepší čitelnost je VRB vynechána. Až na LTO je zde znázorněna horní mez (tedy nejlepší možné skóre při současné úrovni technologie.)	9	3.4 Plošné znázornění ohodnocených parametrů olovené (Pb) technologie baterií.	20
2.5 V tomto grafu je tak jako na obrázcích 2.4 a 2.3 zobrazen počet cyklů při DoD 80 % jednotlivých bateriových technologií, zde ovšem s důrazem na, v tomto parametru naprosto dominantní, VRB technologii. Velikost kruhu zde reprezentuje počet cyklů, stejně tak jako vertikální osa.	10	3.5 Plošné znázornění ohodnocených parametrů NiCd technologie baterií.	20
2.6 Rozdíl mezi nabíjecím a vybíjecím napětím pro jednotlivé bateriové technologie.	11	3.6 Plošné znázornění ohodnocených parametrů NiMH technologie baterií.	21
		3.7 Plošné znázornění ohodnocených parametrů LCO technologie baterií.	22
		3.8 Plošné znázornění ohodnocených parametrů LMO technologie baterií.	22

3.9 Plošné znázornění ohodnocených parametrů NMC technologie baterií.	23	3.19 Tento obrázek znázorňuje vážený průměr pro elektromobily, jednotlivé technologie a roky. ...	29
3.10 Plošné znázornění ohodnocených parametrů LiFePO ₄ technologie baterií.	23	3.20 Tento obrázek znázorňuje vážený průměr pro stacionární úložiště, jednotlivé technologie a roky.	29
3.11 Plošné znázornění ohodnocených parametrů NCA technologie baterií.	24	4.1 Vývojová křivka cen a energetické hustoty pro lithiové články.	32
3.12 Plošné znázornění ohodnocených parametrů LTO technologie baterií.	24	4.2 Vývojová křivka cen a energetické hustoty pro olověné články.	33
3.13 Plošné znázornění ohodnocených parametrů VRB. .	25	4.3 Vývojová křivka cen a energetické hustoty pro NiMH články.	35
3.14 Tato tabulka znázorňuje vzorové hodnoty pro parametry vybraných technologií pro jednotlivé roky pro obr. 3.15 a pro 3.1.	26	4.4 Procentuální zastoupení materiálů vyjma lithia v katodách jednotlivých technologií. [16] ...	36
3.15 Tato tabulka znázorňuje ohodnocené parametry vybraných technologií pro jednotlivé roky. .	26	4.5 Hmotnostní zastoupení materiálů vyjma lithia v katodách jednotlivých technologií na kWh. .	37
3.16 Tento obrázek znázorňuje ohodnocené parametry lithiové technologie pro jednotlivé roky. .	27	4.6 Přepočítání hmotnosti jednotlivých materiálů katod na USD/kWh podle cen Q1 2017; tedy Co = 48; Al = 1,8; Ni = 10 a Mn = 1,9; C = 3,3 (Q3 2016); Li ₂ CO ₃ = 13 USD/kWh.	38
3.17 Tento obrázek znázorňuje ohodnocené parametry olověné technologie pro jednotlivé roky. .	27		
3.18 Tento obrázek znázorňuje ohodnocené parametry NiMH technologie pro jednotlivé roky. .	28		

Tabulky

2.1 Vysvětlivky (1/2) pojmů k obrázku 2.1 . [15]	4
2.2 Vysvětlivky (2/2) pojmů k obrázku 2.1. [15]	6



Kapitola 1

Úvod

V této Bakalářské práci se budu zabývat bateriovými články z ekonomického a částečně i technického hlediska.

Čtenáři se touto prací pokusím poskytnout dostatečný vhled do problematiky technologie baterií za pomoci množství grafických znázornění a interpretací. Zároveň navrhu skupinu možných ekonomických ukazatelů pro aplikaci v elektromobilech a stacionárních úložištích v domácnostech.

Dále si kladu za cíl na bateriové technologie (resp. jejich možné ekonomické ukazatele) nahlédnout z ekonomického hlediska ve zjednodušené grafické podobě, tak aby interpretace byla uchopitelná a dostatečně vypovídající i pro netechnicky zaměřené jedince. Toto nahlédnutí provedu v různých časových obdobích.

Dále znázorním trendy, resp. historický vývoj cen a energetické hustoty pro vybrané bateriové technologie a pokusím se predikovat, kam až se cena za články lithiové technologie může v dlouhodobém horizontu dostat.

Na závěr, podle poznatků, výsledků a metod z předchozích bodů práce, znovu navrhu a ozřejmím budoucí strategie výběru baterií pro použití v domácnostech a elektromobilech.

Kapitola 2

Kategorizace typů bateriových článků

V této kapitole se budu zabývat vybranými typy baterií z technického hlediska. Nadefinuji vybrané parametry baterií a doplním jejich hodnoty pro jednotlivé bateriové technologie. Dále se pokusím na vybrané parametry udělat grafický náhled. Tato kapitola je také velmi důležitá pro další ekonomicky zaměřené kapitoly této práce, které z ní částečně vychází.

Vybral jsem (viz obrázek 2.1) dnešní nejpoužívanější a nejznámější technologie baterií. Velké množství spíše experimentálních technologií zůstalo opomenuto, z klasických např. sírové baterie. Nicméně byly opomenuty i jiné, např. tepelné baterie, nebo různé jiné rezervoáry energie, jako ukládání energie pomocí potenciálu vagónů nebo vzduchu etc. Ty by ostatně pro zaměření této práce nebyly ani příliš relevantní. Obsah práce by se tím také příliš zvětšil a bylo by velice obtížné udělat nějaké smysluplné porovnání.

2.1 Charakteristika baterií

Na bateriový článek se tedy dá nahlédnout z mnoha hledisek. Jaká bude předpokládaná aplikace? Jde o stacionární aplikaci (domovní aplikace, velká industriální úložiště), nebo bude potřeba články převážet (elektromobily, v budoucnu elektrická letadla)? Je potřeba, aby baterie byla schopná prudkého vybití a rychlého nabití (tzv. rapidcharge), nebo nám stačí pozvolné nabíjení a vybíjení, o to však větší životnost a nižší cena? Do jaké míry nám záleží na hmotnosti, na velikosti, energetické hustotě, toxicitě, recyklovatelnosti, ceně etc. Více v [24].

2.1.1 Tabulková charakteristika baterií

Baterie se tedy dají charakterizovat podle mnoha parametrů. Kategorizaci a porovnání bateriových technologií můžeme vidět na obrázku 2.1. Vysvětlivky a popis parametrů uváděných na obrázku 2.1, potom v tabulce 2.1 a 2.2.

Ustálený název	referuje o ustáleném technickém názvu baterie, který je odvozen od názvu chemické sloučeniny baterie, ale je kratší; srozumitelnější.
Char. veličina	technický parametr popisující charakter baterie
Technologie baterií	chemický název technologie baterií
Energetická hustota	[Wh/kg], udává maximální hustotu potenciálně uložené energie v baterii na jednotku hmotnosti.
Vnitřní odpor	je definován jako stejnosměrný odpor vypočítaný z měření při dvou stejnosměrných různých proudech, vnitřní impedance je pak složena z DC odporu a reaktance, která je závislá na frekvenci (a měří se pomocí RLC metru). Běžně se udává DC vnitřní odpor a impedance na 1 kHz.
DoD	[% , Ah]; z ang. Depth of Discharge, tedy hloubka vybití (vybíjení) baterie, je to alternativní metoda udávající SoC baterie, když se SoC zvyšuje, DoD se snižuje a vice versa.
SoC	[%] , z ang. State of Charge, tedy úroveň nabití baterie, 0 % (prázdná) 100 % (plná).
Přebíjení	angl. overcharge, pokračování v nabíjení baterie potom co dosáhne svého plného nabití. Obecně bude mít přebíjení škodlivé účinky na baterii, což může vést k nestabilnímu a nebezpečnému chování baterie. Měli bychom se mu tedy vyhnout.
Tolerance vůči přebíjení	angl. overcharge tolerance, jedná se o toleranci k přebíjení, resp. schopnost baterie snášet přebíjení.
Samovybíjení	jedná se o vlastnost baterie se samovolně, i bez připojení na spotřebič, vybíjet. Jde tedy o úbytek energie kvůli vnitřnímu úniku proudu mezi pozitivní a negativní elektrodou.

Tabulka 2.1: Vysvětlivky (1/2) pojmů k obrázku 2.1 . [15]

Ustálený název	Olověná	-	-	LCO	LMO	NMC	LFP			NCA	LTO	VRB (vanadium redox)	Jednotky
							LiFePO ₄	LiFePO ₄	nLiFePO ₄				
Technologie baterií	Pb	NiCd	NiMH	LiCoO ₂	LiMnO ₂	LiNiMnCoO ₂	LiFePO ₄	LiFePO ₄	nLiFePO ₄	LiNiCoAlO ₂	LiTiO _{1,2}		
Energetická hustota na kg	30 - 50	45 - 80	60 - 120	150 - 200	100 - 150	150 - 220	90 - 120	90 - 120		200-260	70 - 80	[Wh/kg]	
Vnitřní odpor	< 17	20 - 40	40 - 62			75 - 125					1. -> není	[mΩ]	
Počet cyklů (DoD 80%)	200 - 300	1000	300 - 500	500-1000	300-700		1000-2000			4000 +	20000	[-]	
Tolerance vůči přebíjení *	Velmi vysoká	Střední	Nizká			Nizká, není udržovací proud					nizká	[-]	
Samovybití/měsíc (23°C)	5	20	30			< 5					-> není	[%]	
Nominální napětí	2		1,2	3,6	3,7		3,2	3,3	3,6	2,3	1,15 - 1,55	[V]	
Nabíjecí napětí	2,40 - 2,50		1,3		4,2		3,65	3,8	4,2	2,85	1,7 V	[V]	
Vybíjecí napětí	1,75		1		2,5		2	2,5	3	1,8	1,1 V	[V]	
Δ Nab. a Vyb. napětí	0,65 - 0,75		0,3		1,7		1,35	1,3	1,2	1,05	0,6	[V]	
Pulzní proudová zátěž		5C		1C	10C	4C	10C	10C	10C	30C	3 krát **	[A]	
Provozní teplotní rozsah	-20 až 50		-50 až 65				-20 až 60				-5 až -50	[°C]	
Požadavek na údržbu	Vysoký	Úplné vybití každých 90 dní					žádný				Velmi nízký	[-]	
Bezpečnostní požadavek	Tepelná stálost	Tepelná stálost	Tepelná stálost, pojistka			Povinný bezpečnostní obvod					Tepelná stálost	[-]	
Výroba od roku	1800	1950	1990	1991	1996	2008	1996	-	2014	1999	2008	[-]	
Toxicita	Velmi vysoká					Nizká						[-]	
Coulombova účinnost	90		70-90				99				75 - 80	[%]	
Fast charge	Nejde	Při 1C na 100% SoC za > 1h				Při 1C se nabije Lion na cca 70% SoC za < 1h					2 krát **	[-]	
	Velice podobné	Střední hodnota	Rozdílné	Velice rozdílné									

Obrázek 2.1: Zde vidíme kategorizaci bateriové technologie z technického hlediska. * Platí pro otevřenou Pb, uzavřená Pb baterie by měla hodnotu spíše střední. ** Odpovídá přetížení svazku, není v C - rate.

Nominální napětí	jmenovité napětí jinak. Používá se k indikaci napětí baterie. Jelikož vybíjecí křivky nejsou ani lineární ani konstantní, jako typická hodnota se většinou bere ta, která je nejbližší napětí při skutečném použití.
Nabíjecí napětí	výrobce udávané napětí pro nabíjení článku (popřípadě baterie).
Vybíjecí napětí	napětí mezi svorkami článku (popřípadě baterie) při zátěži během vybíjení.
C - rate [5]	rychlost nabíjení a vybíjení baterie se posuzuje podle tzv. C - rate, (ang. rate znamená mj. rychlost, poměr). Kapacita baterie je běžně stanovena na 1C, tzn. že plně nabitá baterie s kapacitou 1 [Ah] by měla poskytnout 1 [A] po dobu 1 hodiny, stejná baterie při vybíjení 0,5C nebo C/2 by měla poskytnout proud 0,5 [A] po dobu 2 hodin a 2C by poskytla 2 [A] po dobu 30 minut.
Pulzní proudová zátěž	z ang. peak load current, tedy maximální proud (ve špičce), který je schopná baterie dodávat.
Provozní teplotní rozsah	rozsah teplot, ve kterých je baterie schopná správně fungovat.
Požadavek na údržbu	určuje, jak je potřeba se o baterii „starat“, co je s baterií potřeba dělat, aby si co nejdéle zachovala požadované parametry, popř. jak často je to potřeba provádět.
Toxicita	neboli „jedovatost“ baterií se odvíjí od použité technologie, tedy od jedovatosti použitých materiálů (např. olovo je značně jedovaté etc).
Coulombova účinnost	ang. Coulombic Efficiency, jde o poměr (který je vyjádřen v %) mezi energií „odebranou“ z baterie během nabíjení v porovnání s energií použitou během nabíjení k obnovení původní kapacity. (ang. také nazýváno Charge Efficiency nebo Charge Acceptance).
Rychlé nabíjení	nebo ang. fast charge, rapid charge, je schopnost bezpečného dobítí baterie za velmi krátkou dobu. Např. u 85 kWh elektromobilu Tesla Model S je možné dobít lithiovou (technologie NCA) baterii z 0 % na 80 % za cca 45 minut. (Samotná Tesla potom používá název supercharge).

Tabulka 2.2: Vysvětlivky (2/2) pojmů k obrázku 2.1. [15]

■ Nahlédnutí na obrázek technické kategorizace 2.1

U legendy k obrázku 2.1; kategorizace bateriové technologie jsou **zelená**, **modrá** a **fialová** barva použity jako prostředky ke grafickému zvýraznění velice podobných vlastností (skóre) v rámci jednoho parametru (v rámci jednoho

řádku; horizontálního členění). Pole bez barvy indikuje určitou průměrnou střední hodnotu, která ovšem není s žádnou jinou technologií nějak zásadně podobná. Extrémy (kladné i záporné) potom indikuje **oranžová** a **červená barva**.

Jak už bylo naznačeno výše, obrázek (respektive tabulka) technické kategorizace baterií je vytvořen tak, aby dal nahlédnout, v čem se jaké technologie baterií podobají, v čem jaké vynikají, v čem jsou jaké špatné, kde jsou v parametrech zvláštnosti nebo extrémy. To vše v kontextu ostatních „základních“ technických parametrů. Parametr, který zde není řádně zastoupen, je cena baterie. Ten můžeme najít v kapitole 3 této práce.

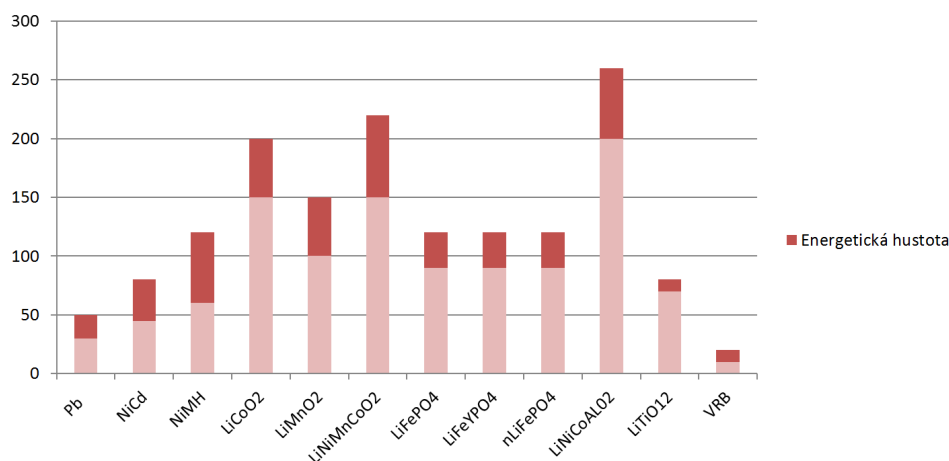
Když se zadíváme na tuto tabulku, uvidíme, že se vertikálně rozdělila do 4 kategorií. Těmito kategoriemi je olověná technologie (Pb), Nikl (NiCd, NiMH) technologie, lithiová (LCO, LMO, NMC, LFP, NCA, LTO) technologie a technologie průtokových baterií VRB. Toto rozdělení podle prvků bylo předpokládáno už od začátku. Tato tabulka slouží jako určité grafické ověření předpokladu. Dále ověřuje, že lithiová technologie zásadně dominuje ve většině parametrů ostatním technologiím. Výjimkou je baterie VRB, která má však z velké části jiné aplikace. Např. je velká a nepoužitelná pro mobilní aplikace (VRB baterie jsou většinou kontejnerových rozměrů, hodí se tedy spíše pro industriální aplikace). Pokud bychom brali v úvahu, že by měl každý rodinný dům mít vlastní bateriové úložiště, tak je VRB nepoužitelná i pro tuto stacionární aplikaci. Nicméně několik domů může používat jednu sdílenou VRB. Menší průtokové baterie vyrábí např. firma Redflow, která ovšem nedodává VRB ale ZNBR průtokové baterie o velikosti 10 kWh. [6]

Výborné vlastnosti lithiových baterií ostatně můžeme vidět i na obrázku 3.1, kde jsou parametry ohodnoceny (oškálovány) na stupnici od 0 do 5 (0 je nejhorší a 5 je nejlepší).

Z obrázku 2.1 se jeví korelace taková, že čím novější technologie baterie, tím do určité míry lepší parametry, a pravděpodobně i lepší potenciál do budoucna. Do starší technologie totiž už bylo vloženo spoustu úsilí ji zdokonalit, a už se tedy pravděpodobně nemá kam posouvat, nebo bude posun značně pomalý a neefektivní. Toto souvisí i s tím, že když dojde k nějakému velkému kvalitativnímu posunu parametrů např. obecně u lithiové technologie, tak se nezlepší ta jedna konkrétní lithiová technologie, ale vznikne lithiová technologie jiná, s jiným názvem, s jiným chemickým složením.

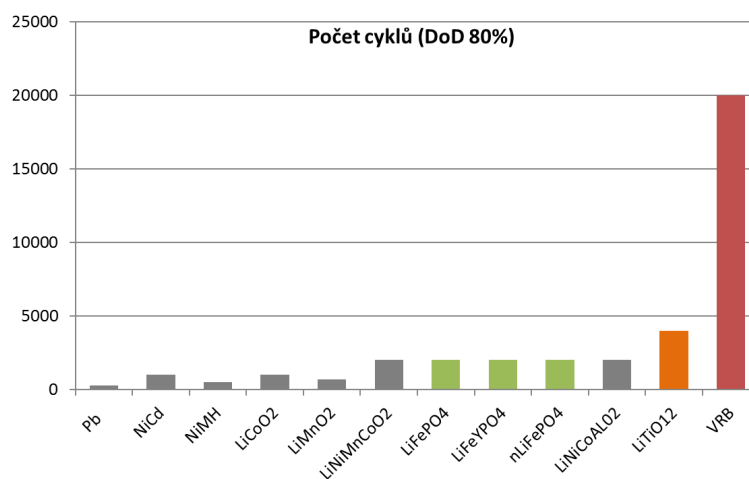
2.1.2 Grafické znázornění charakteristiky baterií

V této sekci se pokusím interpretovat a dát do souvislostí některé charakteristiky baterií (viz obrázek 2.1).



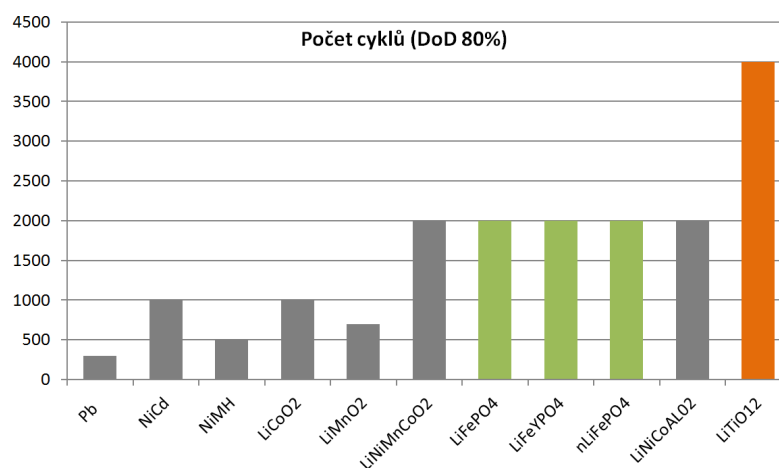
Obrázek 2.2: Znázornění rozpětí energetické hustoty [Wh/kg] různých technologií bateriových článků pro rok 2015.

Na obrázku 2.2, resp. grafu, můžeme vidět znázornění rozpětí energetické hustoty [Wh/kg] různých technologií bateriových článků. **Tmavě červená** zde vyjadřuje možné rozpětí energetické hustoty pro jednotlivé technologie, **světle červená** potom minimální hodnotu. Vidíme, že maximální energetickou hustotu má technologie NCA ($LiNiCoAlO_2$); proto jí také používá např. firma Tesla ve svých elektromobilech Tesla Model S a Model X nebo také Toyota v Toyotě Prius. Technologie VRB má naopak velice malou hustotu energie, nicméně cena/kWh/cyklus je o řád nižší než u většiny ostatních technologií. VRB se proto hodí výborně pro větší stacionární bateriová úložiště, kde rozměry a váha nehrají takovou roli. Můžeme si také všimnout, že všechny technologie LFP mají stejnou energetickou hustotu, a to kolem 100 [Wh/kg]. Plyne to z toho, že se většinou LFP technologie uvádí jako celek, je tedy značně obtížné dohledat přesné hodnoty (ostatně jako u všech technologií). Nicméně rozptyl minimální a maximální hodnoty by měl být dostatečně veliký, aby do sebe zakomponoval možné rozdíly mezi jednotlivými typy LFP. Vidíme také, že v tomto srovnání nevyhází nejlépe „vyzrálá“ olověná (Pb) technologie baterií. Ta má hned po VRB nejmenší hustotu, a to maximálně kolem 50 [Wh/kg]. Na rozdíl od ostatních technologií (především lithia) se zde neočekává, právě kvůli své „vyzrálosti“ přílišné zlepšení do budoucna. Ostatně i množství nově budovaných bateriových úložišť se v posledních letech, tedy alespoň v Německu, přehouplo z dominance olověné technologie na lithiovou. [1], [18].



Obrázek 2.3: Graf porovnání bateriových technologií z pohledu počtu cyklů při 80 % DoD. Až na VRB a LTO je zde znázorněna horní mez (tedy nejlepší možné skóre při současné úrovni technologie.)

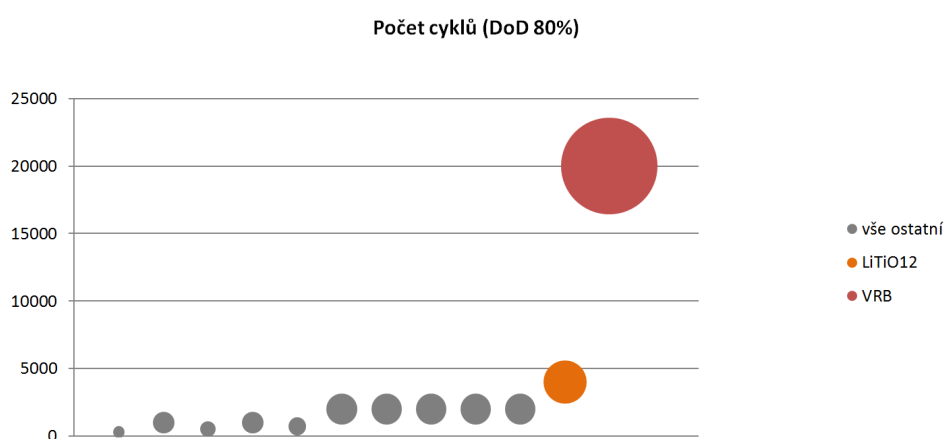
Na obrázku 2.3 můžeme vidět porovnání bateriových technologií z pohledu počtu cyklů při 80 % DoD. Zatímco na obrázku 2.2 vidíme, že VRB má energetickou hustotu asi 10 - 20 [Wh/kg], tak počtem cyklů se naprosto vymyká všem ostatním bateriovým technologiím se svými 20000 a více cykly. Nejbližší za ní je technologie LTO ($LiTiO_{12}$) se svými 4000 a více cykly. Zelená barva zde znázorňuje balíček technologie LFP. Oranžová a červená potom referuje k obrázku 2.1 a jejímu barevnému členění. Bližší porovnání ostatních technologií můžeme vidět na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Graf porovnání bateriových technologií z pohledu počtu cyklů při 80 % DoD; pro lepší čitelnost je VRB vynechána. Až na LTO je zde znázorněna horní mez (tedy nejlepší možné skóre při současné úrovni technologie.)

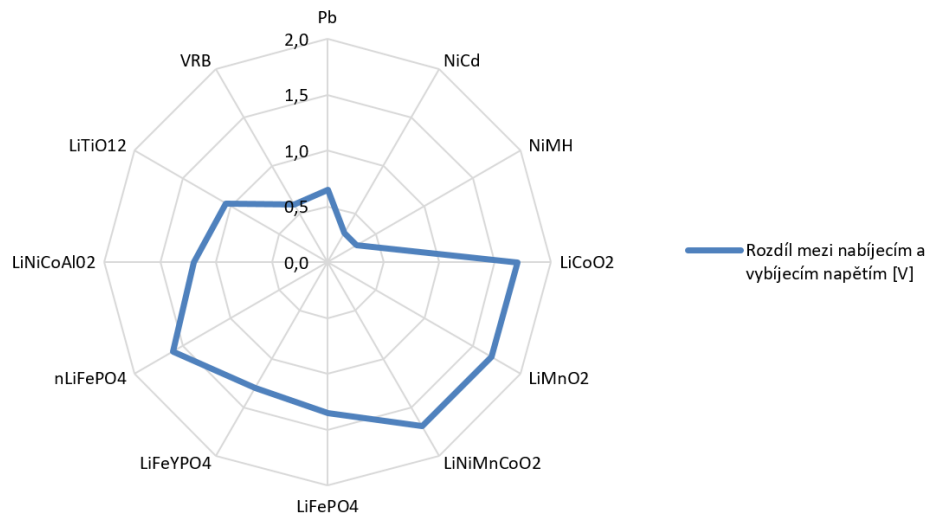
Na obrázku 2.4 vidíme porovnání bateriových technologií jako na obrázku

2.3, ale chybí zde technologie VRB, která by znemožňovala grafické porovnání ostatních technologií mezi sebou. Barevné rozčlenění je stejné jako na obrázku 2.3. Vidíme zde také, že technologie LFP, NMC ($LiNiMnCoO_2$) a NCA ($LiNiCoAlO_2$) mají při DoD 80 % stejný počet cyklů, a to mezi 1000 a 2000. Nejmenší počet cyklů má potom technologie Pb, s 200 - 300 cykly; což jí společně (viz obrázek 2.2) s nejmenší energetickou hustotou dále posouvá do nejméně perspektivního segmentu bateriové technologie.



Obrázek 2.5: V tomto grafu je tak jako na obrázcích 2.4 a 2.3 zobrazen počet cyklů při DoD 80 % jednotlivých bateriových technologií, zde ovšem s důrazem na, v tomto parametru naprosto dominantní, VRB technologii. Velikost kruhu zde reprezentuje počet cyklů, stejně tak jako vertikální osa.

Na obrázku 2.5 je ilustrováno absolutní množství množství cyklů VRB při 80 % DoD, proti všem cyklům ostatních bateriových technologií uvedených na obrázku 2.1. Vidíme tedy, že VRB zaujímá vsutku výjimečné nadpoloviční postavení (ve zmíněné tabulce na obrázku 2.1 je totiž dalších 11 technologií baterií). V Česku vznikla v nedávné době průtoková baterie za spolupráce VŠCHT a ZČU ve výzkumném centru NTC (výzkumné centrum nových technologií Západočeské univerzity v Plzni) [23].



Obrázek 2.6: Rozdíl mezi nabíjecím a vybíjecím napětím pro jednotlivé bateriové technologie.

Na obrázku 2.6 je znázorněn rozdíl mezi nabíjecím a vybíjecím napětím pro články jednotlivých technologií. Pokud by byl například rozdíl mezi napětím nabité baterie (které se prakticky rovná nabíjecímu napětí) a vybité baterie (vybíjecí napětí) příliš velký, bylo by nutné během procesu nabíjení a vybíjení používat stabilizaci napětí. Pokud bychom měli například obvod uzpůsobený pro napětí 3,3 [V] a připojíme ho k lithiové baterii s maximálním napětím 4,15 [V], potřebujeme regulátor, který bude napětí snižovat na 3,3 [V]. Téměř vybitá baterie má potom napětí 2,5 [V], a potřebujeme tedy regulátor, který zvýší napětí na 3,3 [V]. Tzn. potřebujeme zvyšovat i snižovat o velké hodnoty napětí, a takovéto měniče mají malou účinnost. V tomto porovnání tedy lithium iontové baterie nevycházejí oproti niklovým technologiím a olovené technologii nejlépe. Jde ovšem pouze o jeden z posuzovaných parametrů. Ve většině ostatních parametrů lithiové baterie vyjma VRB naprosto dominují.

Mírně rozšířenou analýzu bateriových parametrů lze najít v předcházející práci Individuálního projektu. [22].

Kapitola 3

Ekonomické ukazatele

V kapitole 2 jsem se zabýval parametry baterií z technického hlediska. V této kapitole se budu zabývat těmito parametry z hlediska ekonomického. Na každý ze zmíněných parametrů lze totiž nahlédnout jako na ekonomický ukazatel dané technologie baterií, ať už pro účel použití v elektromobilech, nebo pro stacionární úložiště v domácnostech. Dané parametry jsem, abych je mohl porovnat, ohodnotil, oškáloval (to můžeme vidět např. na obr. 3.1, metodologie je zmíněna v sekci 3.2.1).

3.1 Získání a analýza dat

V průběhu dělání rešerše k této bakalářské práci jsem zjistil, že získání prakticky jakýchkoliv relevantních a především důvěryhodných dat je extrémně těžký úkol. O to více u historických dat resp. vývojových křivek (velkoobchodní ceny za kWh, energetické hustoty etc.)

Není nic neobvyklého, že cenový rozdíl mezi „stejnými“ lithiovými bateriovými články na Alibaba.com je vyšší desítek procent. Jak mi bylo řečeno v jednom českém velkoobchodě: „Dokud se to nezměří, tak nikdo neví, co to vlastně je.“ Tzn. pro opravdu relevantní porovnávání bateriových článků by bylo potřeba tyto články s různými roky výroby fyzicky mít (ideálně větší množství) a každý jednotlivý proměřit. Což pochopitelně v rozsahu této bakalářské práce nebylo možné udělat, nehledě na to, že by mnohé články ani nebylo možno koupit.

Při pokusu o získání vývojových křivek cen pro jednotlivé technologie baterií jsem se obrátil na desítky českých i zahraničních obchodů s bateriemi. Odpovědi jsem dostal poskrovnu a použitelná data prakticky žádná.

Valná většina v této práci použitelných dat je tedy vybrána z různých rešerší a analýz společností, které k datům přístup mají, resp. si je mohou dovolit koupit. Vývojové křivky cen a další data se dají koupit např. od společnosti Navigant Research za nižší tisíce dolarů (USD).

Problém s daty cen z rešerší a analýz je ovšem ten, že se tam často neuvádí specificky, o jakou lithiovou technologii se jedná, ale pouze že jde o nějakou „obecnou“ lithiovou technologii. V následující vývojové analýze se tedy také budu zabývat lithiovou technologií baterií jako celkem. Dalším problémem je, že u cen za kWh často není uvedeno, jestli se jedná o celou kapacitu baterie, nebo se počítá s nějakou rezervou. Mým předpokladem tedy je, že se uvádí skutečná kapacita bez rezervy, a při cyklování na 80% DoD jsem hodnoty přepočítal na odpovídající použitelnou kapacitu.

V této práci také kvůli nedostatku dat uvažuji, že se s vývojem dané technologie mění pouze energetická hustota na kg a cena. Ostatní parametry zůstávají stejné. Tzn. přestože se např. s časem (rokem výroby) díky inovaci zvyšuje počet cyklů při 80 % DoD, které je baterie schopná snést, tak zde uvažuji, že počet cyklů je stále stejný.

■ 3.2 Takulky ohodnocených parametrů ekonomických ukazatelů

■ 3.2.1 Metodologie hodnocení jednotlivých parametrů

Parametry jsem se snažil hodnotit exaktně, a to na stupnici od 0 do 5. 0 se vztahuje k nejhoršímu výsledku (ozn. červeně) a 5 k nejlepšímu (ozn. modře). Nicméně přestože parametr u nějakého typu baterií dosáhne hodnoty např. 1, neznamena to automaticky, že dosáhl obecně velice špatného výsledku. Špatného výsledku ovšem dosáhl v celkovém kontextu všech druhů zmíněných baterií. U čísla vyjádřených parametrů z tabulky na obr. 2.1 byla použita pro každý jednotlivý parametr referenční hodnota největšího, popř. nejmenšího čísla (v daném řádku) a byla ohodnocena číslem 5. Ostatní byly ohodnoceny proporčně vzhledem k tomuto referenčnímu číslu. Parametry, které nejsou vyjádřeny číselně, jsem pouze ohodnotil na stupnici od 0 do 5. Zde se jedná o parametry tolerance vůči přebíjení, požadavek na údržbu, bezpečnostní požadavek, toxicita a rychlé nabíjení.

Také jsem každému parametru a aplikaci (elektromobily, resp. EV z ang. electric vehicle a stac. úložiště), podle dotazníku expertního šetření, přiřadil koeficient váhy. A to na stupnici od 1 do 7. Tyto koeficienty zvyšují hodnotu parametrů pro danou aplikaci. Také je pomocí nich počítán vážený průměr pro jednotlivé technologie, který má za úkol charakterizovat danou bateriovou technologii co možná nejjednodušeji, tedy pomocí jednoho čísla. Hodnoty těchto vážených průměrů a „růžových“ průměrů můžeme vidět u části kruhových grafů v pravém horním rohu. Původně jsem chtěl koeficienty váhy upravit k „obrazu svému“, tedy tak aby, dle mého názoru, lépe reprezen-

tovaly důležitost daných parametrů. Nakonec jsem se ale rozhodl použít koeficienty neupravené. Toto s sebou ovšem nese určité „neduhy“. O těch se více zmíním při popisu tabulky ohodnocených parametrů. Z tohoto důvodu jsem do obrázku 3.1 přidal ještě průměr, dle mého názoru, z nejdůležitějších parametrů.

3.2.2 Tabulka ekonomických ukazatelů pro rok 2015

Tabulka na obr. 3.1 znázorňuje ohodnocené (oškálované) parametry pro jednotlivé bateriové technologie pro rok 2015.

Rok 2015 je bohužel jediným rokem, pro který jsem našel ucelené údaje pro jednotlivé bateriové technologie. (Získat skutečně aktuální validní data je totiž téměř nemožné.) Má zde tedy výsostné postavení a bohužel z důvodu nedostatku dat není plně „kompatibilní“ s měnicími se parametry předchozích let. Porovnání „kompatibilních“ dostupných dat můžeme vidět na obrázku 3.15.

Když se zahledíme na obrázek 3.1, vidíme, že se nám technologie baterií rozdělily stejně jako v sekci 2.1.2. Znovu jsme tedy dostali olověnou, nikl a lithiovou technologii a technologii průtokových baterií VRB. Když se zadáváme na vážený průměr a na „růžový“ průměr, vidíme, že lithiová technologie jasně dominuje pro aplikaci v elektromobilech (potažmo i pro aplikaci jako stacionární úložiště pro rodinné domy). Naopak olověná technologie vyšla pro jakoukoliv aplikaci jasně nejhorší. VRB má naopak výsostné postavení pro použití ve stacionárních úložištích. Nicméně zde je potřeba výsledek brát s rezervou. VRB, jak už jsem psal v sekci 2.1.1, není z důvodu své velikosti úplně ideální pro stacionární úložiště v rodinných domech. Nicméně obecně pro stacionární bateriové úložiště pro regulaci sítě nebo pro industriální aplikace je jistě velice zajímavá. U VRB jsem také uměle snížil vážený průměr pro elektromobily. A to z hodnoty 2,8 na 0. Pro použití v mobilních aplikacích je totiž VRB ze zřejmých důvodů těžko představitelná.

Neduhy koeficientů váhy podle expertního šetření

Expertní šetření vyplnilo velice malé množství odborníků. Respektive šetření mělo vstupy v řádu jednotek. Dále můžeme na obrázku 3.1 vidět, že například u koeficientů pro elektromobily (EV) je velké množství hodnot přesahující číslo 6. Tedy velké množství parametrů je těmito koeficienty postaveno sobě rovným. Myslím si ale, že především parametry označené v tabulce růžově, by měly mít výsostnější postavení. Proto jsem také k porovnání dal průměr z těchto parametrů. Nejsem si jist, jak by šlo tyto neduhy odstranit. Pomoci

3.2. Takulky ohodnocených parametrů ekonomických ukazatelů

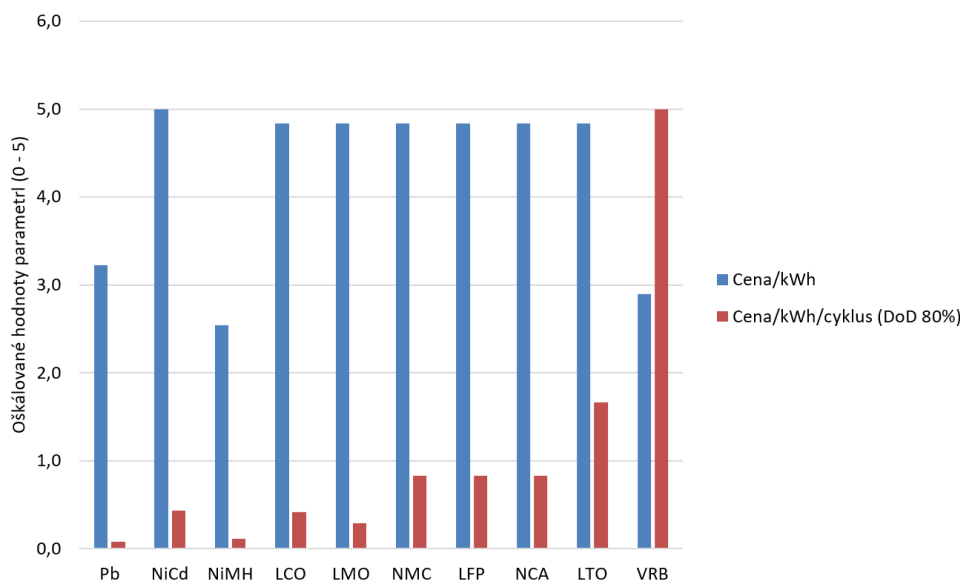
Rok	2015															Koefficienty váhy podle expertního šetření	
	Ustálený název Technologie baterií	Olovená Pb	- NiCd	- NiMH	LCO LiCoO ₂	LMO LiMnO ₂	NMC LiNiMnCoO ₂	LFP			NCA LiNiCoAlO ₂	LTO LiTiO ₂	VRB (vanadium)	EV	Stac. Úlož.		
								LiFePO ₄	LiFePO ₄	nLiFePO ₄							
Energetická hustota na kg	1,0	1,5	2,3	3,8	2,9	4,2	2,3	2,3	2,3	5,0	1,5	0,4	6,5	2,5			
Vnitřní odpor	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	5,0	5,0	6,0	6,0			
Počet cyklů (DoD 80%)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	5,0	6,5	5,0			
Tolerance vůči přebíjení	5,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5,0	2,0			
Samovybití/měsíc	1,0	0,3	0,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5,0	3,0	5,5			
Nominální napětí	2,7	1,6	1,6	4,9	5,0	5,0	4,3	4,3	4,5	4,9	3,1	2,1	3,0	2,5			
Δ Nab. a Vyb. napětí	2,3	5,0	5,0	0,9	0,9	0,9	1,1	1,2	0,9	1,3	1,4	2,5	3,5	4,5			
Pulzní proudová zátěž	0,8	0,8	0,8	0,2	1,7	0,7	1,7	1,7	1,7	0,2	5,0	6,0	6,0	3,0			
Provozní teplotní rozsah	3,0	5,0	5,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	2,4	2,4	5,5	3,5			
Požadavek na údržbu	1,0	3,0	3,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,0	4,0	6,0	3,5			
Bezpečnostní požadavek	5,0	5,0	5,0	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	6,5	4,0			
Toxicita	1,0	1,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	2,0	5,0	2,0			
Coulombova účinnost	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,0	4,0	5,0	4,0			
Rychlé nabíjení	0,0	5,0	5,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	2,9	6,5	2,0			
Cena/kWh	3,2	5,0	2,5	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	2,9	4,5	5,0			
Cena/kWh/cykklus (DoD 80%)	0,1	0,4	0,1	0,4	0,3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,7	5,0	5,0	6,0			
Průměr (z různých hodnot)	0,4	0,7	0,8	1,5	1,1	1,9	1,2	1,2	1,2	2,1	1,4	3,5	3,5	3,5			
Vážený průměr EV	1,9	2,6	2,6	2,7	2,8	2,9	2,8	2,8	2,8	3,0	3,4	0 *	3,4	3,4			
Vážený průměr Stac. Úlož.	1,8	2,4	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	3,2	3,4	3,4	3,4			

Obrázek 3.1: Tento obrázek znázorňuje ohodnocené parametry (ekonomické ukazatele) baterií z obrázku 2.1 a 3.14 k roku 2015. Každému parametru je přiřazena hodnota mezi 0 a 5, kdy 5 znamená nejlepší hodnocení a 0 znamená nejhorší. * 0 je zde uměle doplněna. VRB je totiž velice nevhodná k použití v elektromobilech.

3.3 Grafická charakteristika baterií z obrázku 3.1

V této části můžeme na následujících grafech vidět grafická znázornění obrázku (resp. tabulky) 3.1. Jsou zde z velké části použity „kruhové“ grafy, a to za účelem lepšího vyzoborování trendu; vybarvená plocha grafu se může někam, nebo k něčemu (k nějaké technologii baterií nebo parametru) „naklánět“. U většiny kruhových grafů jsou také vyobrazeny vážené průměry pro aplikaci v elektromobilech (žlutě) nebo pro aplikaci pro stacionární úložiště (zeleně) v rodinných domech a „růžový“ průměr ze třech vybraných parametrů (růžově). Jde o parametry energetické hustoty na kilogram, počet cyklů při DoD 80 % a cena/kWh/cyklus při DoD 80 %.

3.3.1 Cena baterií za kWh vs. cena baterií za kWh na cyklus (DoD 80%)

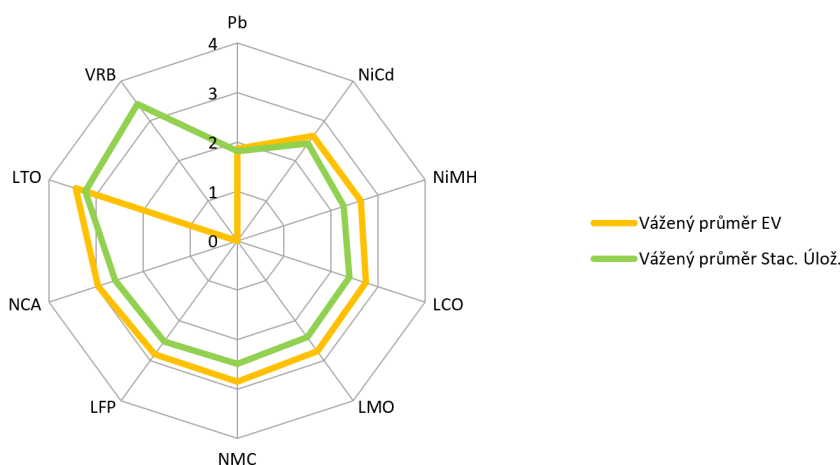


Obrázek 3.2: Porovnání ceny baterií podle obrázku 3.1 (tedy čím vyšší číslo na stupnici od 1 do 5, tím lepší) pro [cenu/kWh] a [cenu/kWh/cyklus (DoD 80%)].

Jak vidíme na obrázku 3.2, tak [cena/kWh] a [cena/kWh/cyklus (DoD 80%)] vykazuje zcela jiné výsledky. Mohlo by se například zdát, že cena olovené technologie není tak špatná. Po vztáhnutí na cyklus ovšem dosahuje doslova tristních výsledků. Cenu jako veličinu je potřeba vztáhnout na další žádané parametry. Např. dosažitelný počet cyklů baterie je téměř v každém případě jeden z nich (toto neplatí například u UPS, kdy baterie pouze nečinně „leží“ a je využita pouze v kritické situaci výpadku proudu). Jako další by se jevila např. hmotnost nebo objem etc. Vztážením na cyklus je ovšem, dle mého názoru, vztážením základní. V tomto grafu můžeme znovu pozorovat, že lithiové a VRB technologie vychází z pohledu ceny a počtu cyklů nejlépe.

Nutno uznat, že tento graf z důvodu nedostatku dat nereprezentuje zcela správně skutečnost. Pro lithiovou technologii je brána jednotná „nejlepší“ cena 300 USD za kWh, která je pouze vztažena na počet cyklů daných technologií. Vývojové křivky dostupných cen můžeme vidět v kapitole 4.

3.3.2 Celkové ohodnocení

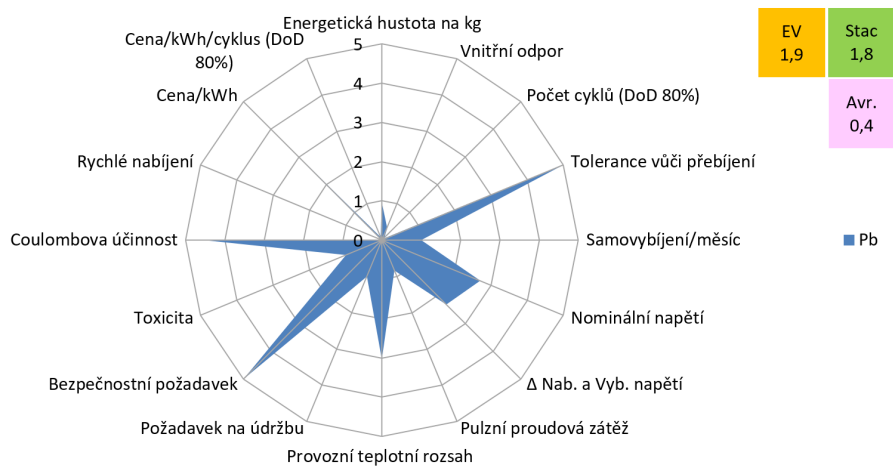


Obrázek 3.3: Celkové porovnání jednotlivých technologií na základě vážených průměrů.

I podle obrázku 3.3, stejně tak jako už bylo výše několikrát zmíněno, v celkovém ohodnocení vycházejí nejlépe jednoznačně lithiové baterie. VRB je jasným vítězem, co se stacionárního úložiště týče. Nicméně jak už bylo psáno výše, tak je tato technologie pro aplikace v rodinných domech prozatím spíše nepoužitelná a zcela nepoužitelná pro mobilní aplikace. Nejlepší se tedy i zde jeví pro obě zvažované aplikace lithiové technologie. Nejhůře obstála olověná technologie a Ni technologie také nedopadly nejlépe. Tyto skutečnosti podtrhují i vývojové křivky v kapitole 4.

3.3.3 Olověná technologie (Pb, lead - acid)

Olověná technologie je technologicky nejstarší z prezentovaných technologií baterií. Její počátky sahají až do roku 1859. Přes stáří této technologie má stále mnoho aplikací, např. autobaterie, golfové vozíky, UPS a také jí stále přísluší i menší (a stále se, alespoň v Německu, snižující) podíl při výstavbě nových velkých bateriových úložišť (jak už bylo zmíněno v sekci 2.1.2). [9] Vypadá to tedy, že olověná technologie stále má nějakou „setrvačnost“ co se použití týče, ale pomalu ji ztrácí kvůli stále levnější lithiové technologii.

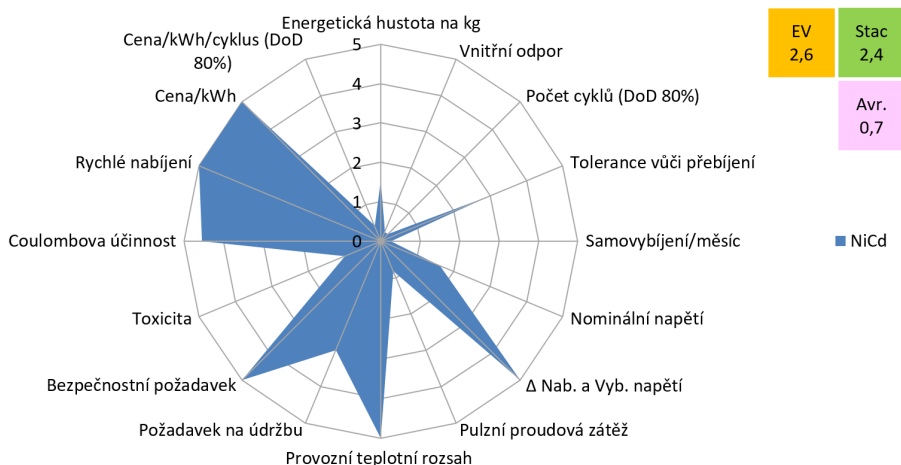


Obrázek 3.4: Plošné znázornění ohodnocených parametrů olověné (Pb) technologie baterií.

3.3.4 Nikl technologie

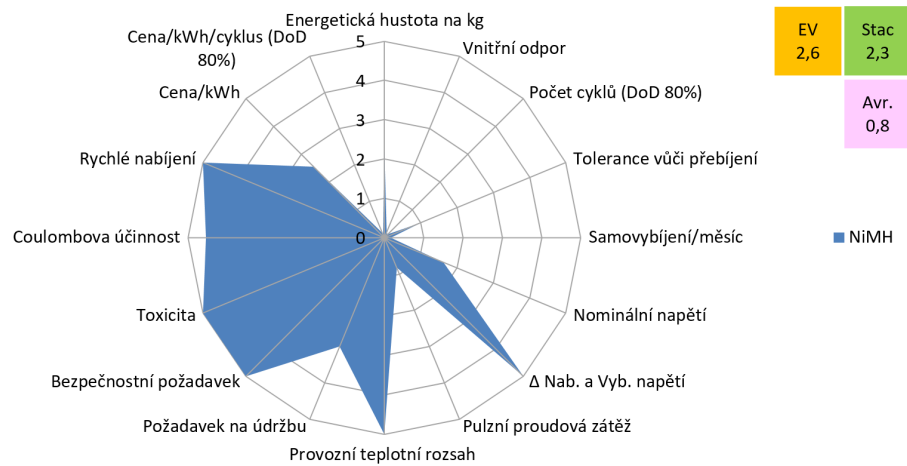
Před nástupem lithiové technologie baterií se přenosná zařízení 50 let téměř výhradně spoléhala na NiCd technologii, tedy až do 90. let, kdy tuto úlohu z důvodu toxicity NiCd převzal NiMH (viz obrázky 3.5 a 3.6, kde vidíme že toxicita mezi těmito dvěma nikl technologiemi je zásadně rozdílná). Jinak ovšem z výše zmíněných obrázků (grafů) vidíme, že jsou tyto dvě niklové technologie, až na energetickou hustotu, v zásadě velice podobné. [2]

Nickel-Cadmium (NiCd)



Obrázek 3.5: Plošné znázornění ohodnocených parametrů NiCd technologie baterií.

■ Nickel-metal hydrid (NiMH)

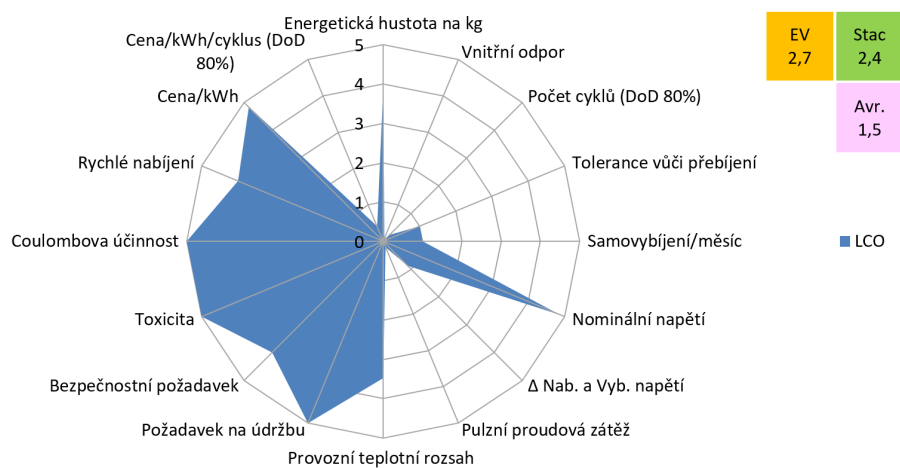


Obrázek 3.6: Plošné znázornění ohodnocených parametrů NiMH technologie baterií.

■ 3.3.5 Lithiová technologie

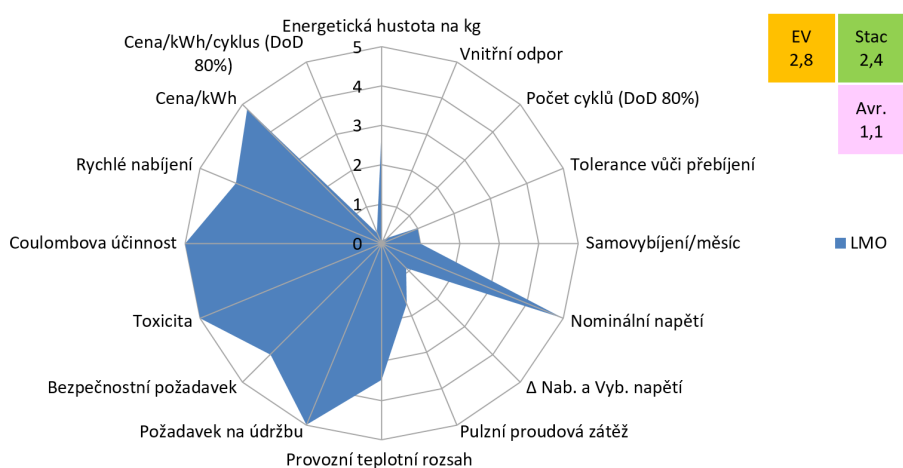
První dobíjecí lithium-iontové baterie se začaly objevovat v 90. letech 20. století a postupně se staly dominantní bateriovou technologií pro mobilní aplikace. V posledních letech se stávají dominantními i pro aplikace stacionární. Lithium je nejlehčí ze všech kovů, má největší elektrochemický potenciál a poskytuje pozoruhodnou energetickou hustotu. [3] Celková cena lithium-iontových baterií od svého uvedení na trh navíc nelineárně klesá, což můžeme vidět na obrázku 4.1.

LCO (LiCoO₂)



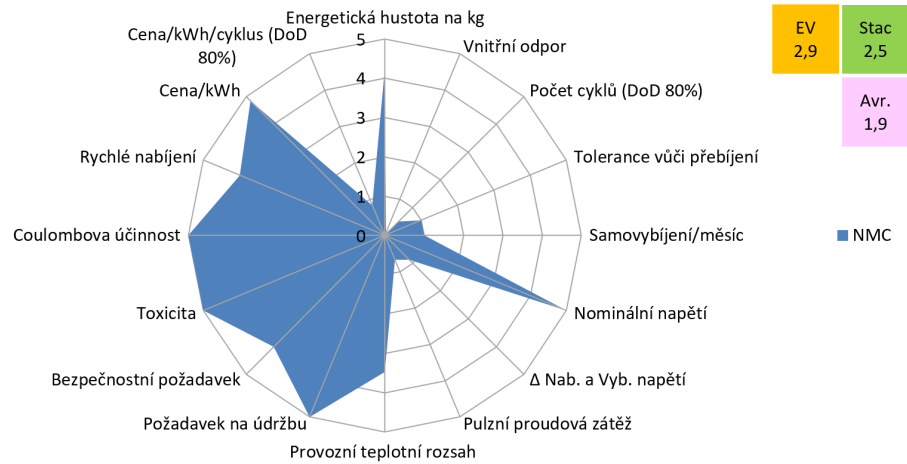
Obrázek 3.7: Plošné znázornění ohodnocených parametrů LCO technologie baterií.

LMO (LiMnO₂)



Obrázek 3.8: Plošné znázornění ohodnocených parametrů LMO technologie baterií.

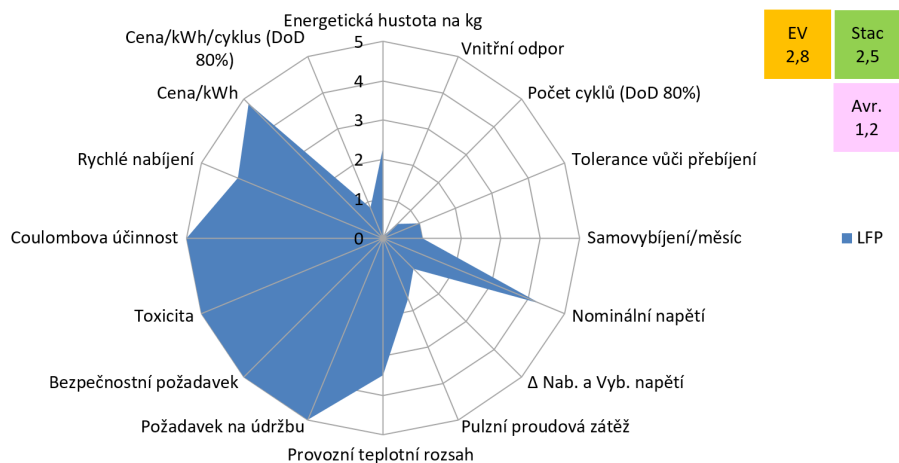
■ NMC (LiNiMCo₂)



Obrázek 3.9: Plošné znázornění ohodnocených parametrů NMC technologie baterií.

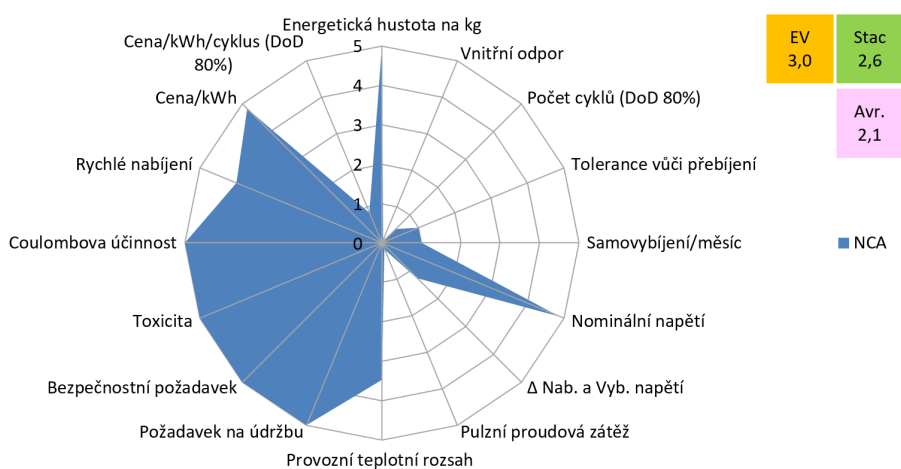
■ LFP

V této sekci vidíme znázorněnou LFP technologii. V tabulce 3.1 můžeme vidět znázorněny všechny tři LFP technologie podle obrázku 3.1. Vidíme, že nLiFePO₄ a LiFePO₄ se v ohodnocení vůbec neliší. Naproti tomu má technologie LiFeYPO₄ mírně lepší parametry v oblasti nabíjecího a vybíjecího napětí. Pro svoji podobnost téměř ve všech parametrech jsem zde uvedl pouze jeden graf.



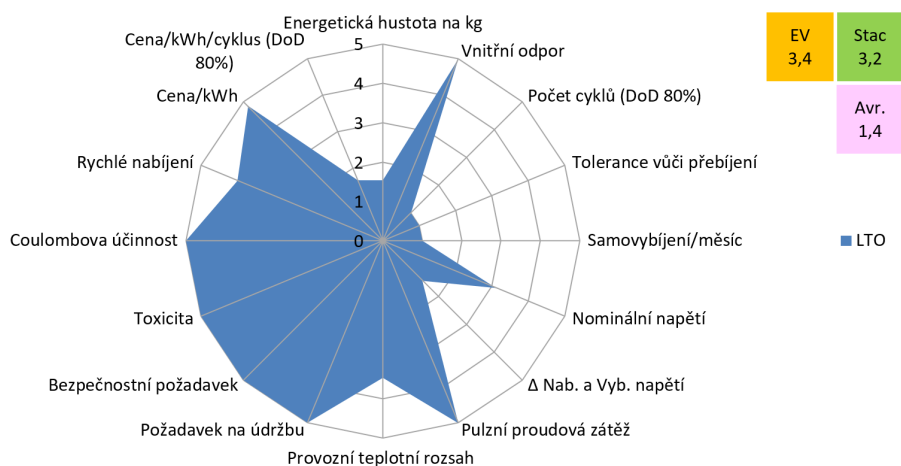
Obrázek 3.10: Plošné znázornění ohodnocených parametrů LiFePO₄ technologie baterií.

NCA (LiNiCoAlO₂)



Obrázek 3.11: Plošné znázornění ohodnocených parametrů NCA technologie baterií.

LTO (LiTiO₁₂)

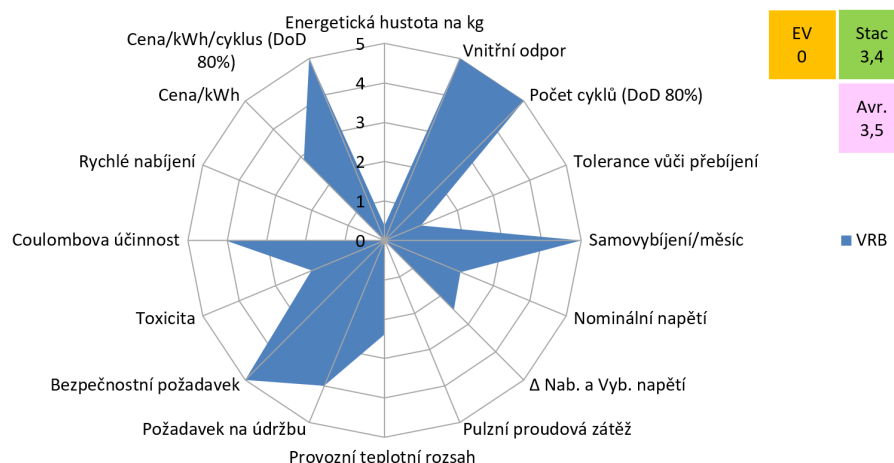


Obrázek 3.12: Plošné znázornění ohodnocených parametrů LTO technologie baterií.

Jak už bylo zmíněno v sekci 3.2.2, u technologie LTO, pravděpodobně více než kde jinde vážený průměr pro elektromobily (EV) zcela neodpovídá realitě. Vidíme, že průměr (Avr.) zde dosahuje pouze 1,4.

3.3.6 VRB (Vanadium redox)

VRB



Obrázek 3.13: Plošné znázornění ohodnocených parametrů VRB.

Průtokové baterie, do kterých VRB spadá, je v principu kombinace mezi klasickou baterií a palivovým článkem. Jak můžeme vidět z obrázku 2.1, má tato technologie některé specifické vlastnosti, především potom skvělou cyklovatelností, tedy i velice nízkou cenu/kWh/cyklus (od druhé nejlevnější technologie se stále řádově liší). Tyto vlastnosti vycházejí ze samotného principu baterie, který umožňuje používat dva různé elektrolyty. [4]

Na obrázku 3.13 chybí ohodnocení parametrů rychlého nabíjení a pulzní proudové zátěže. I vážené průměry jsou zde spočítány bez těchto dat.

Vynechání těchto parametrů je z důvodu nekompatibility dat pro VRB a zbytek bateriových technologií. U průtokových baterií C - rate totiž nedává valný smysl. Výkon baterie je většinou fixovaný, ale kapacita se dá „nastavit“ jakákoliv. (Zde se typicky pohybujeme nad poměr $\frac{\text{kapacita}}{\text{výkonu}} > 5$.) Přetížení bateriového svazku je možné při nabíjení dvakrát při vybíjení třikrát oproti nominálnímu výkonu. Nominální výkon je potom pro nás výkon při konstantním proudu, kdy má baterie účinnost přes 80 %. [27]

Z těchto důvodů jsem se tedy tyto parametry rozhodl nechat nevyplněné. Přestože by číslo váženého průměru pro elektromobily vyšlo 2,8, tak ho nemůžeme kvůli rozměrům VRB brát vážně, a je zde tedy uměle sníženo na 0. Pro stacionární úložiště není pulzní proudová zátěž a rychlé nabíjení jako

parametr příliš důležitý. Vážený průměr pro stacionární úložiště tedy můžeme považovat za zcela relevantní.

3.4 Tabulka ekonomických parametrů pro jednotlivé roky

Z důvodu zmíněné nekompatibility a nedostatku dat jsem byl nucen toto porovnání udělat „navíc“ k sekci 3.2.2. Jako energetická hustota a cena je zde brána vždy nejlepší možnost. To a nedostatek dat (např. lithiová technologie je zde jako celek) způsobuje nemožnost porovnání dat přímo s daty z tabulky 3.1. Je tu tedy znovu i rok 2015, tentokrát však z trochu „deformovaného“ pohledu nepřesných, nekonkrétních a omezených dat.

Rok	2015			2010			2005	2000	1995	Jednotky
	Obecně lithiov.	Olov. Pb	- NiMH	Obecně lithiov.	Olov. Pb	- NiMH	Obecně lithiov. tech			
Energetická hustota na kg	260	50	120	240	47	108	190	150	120	Wh/kg
Cena/kWh	300	450	570	600	520	740	1000	1800	3200	USD/kWh
Cena/kWh/cyklus (80% DoD)	0,24	1,88	1,43	0,49	2,17	1,85	0,81	1,46	2,59	USD/kWh

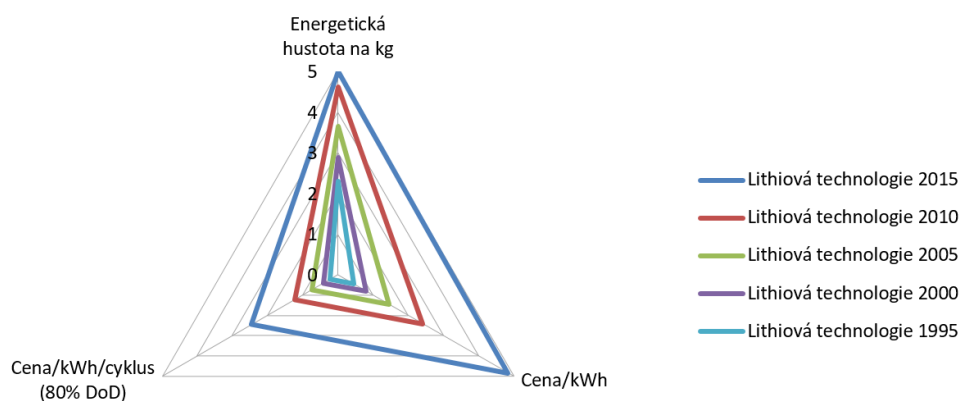
Obrázek 3.14: Tato tabulka znázorňuje vzorové hodnoty pro parametry vybraných technologií pro jednotlivé roky pro obr. 3.15 a pro 3.1.

Rok	2015			2010			2005	2000	1995	Koefficienty váhy	
	Obecně lithiov.	Olov. Pb	- NiMH	Obecně lithiov.	Olov. Pb	- NiMH	Obecně lithiov. tech			Elektromobil	Stac. Úlož.
Energetická hustota na kg	5,0	1,0	2,3	4,6	0,9	2,1	3,7	2,9	2,3	6,5	2,5
Cena/kWh	4,8	3,2	2,5	2,4	2,8	2,0	1,5	0,8	0,5	4,5	5,0
Cena/kWh/cyklus (80% DoD)	2,5	0,1	0,1	1,2	0,1	0,1	0,7	0,4	0,2	5,0	6,0
Vážený průměr EV	4,2	1,3	1,7	2,9	1,2	1,4	2,1	1,5	1,1		
Vážený průměr Stac. Úlož.	3,8	1,4	1,4	2,3	1,2	1,1	1,5	1,0	0,7		

Obrázek 3.15: Tato tabulka znázorňuje ohodnocené parametry vybraných technologií pro jednotlivé roky.

3.4.1 Lithiová technologie

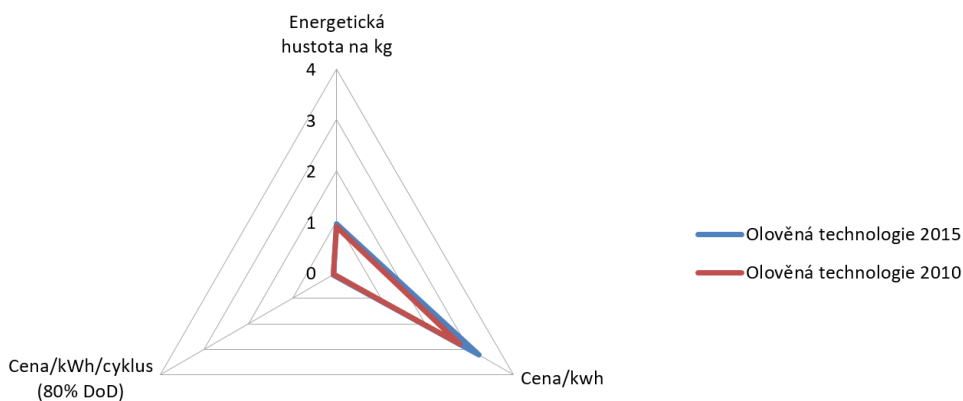
Jak můžeme vidět na obrázku 3.16 tak největší (a nelineární) růst hodnot posledních 20 let se týká ceny, což je obecný trend lithiové technologie. Můžeme ho pozorovat např. i na obrázku 4.1. Energetická hustota stoupá spíše pozvolna a lineárně.



Obrázek 3.16: Tento obrázek znázorňuje ohodnocené parametry lithiové technologie pro jednotlivé roky.

3.4.2 Olověná technologie

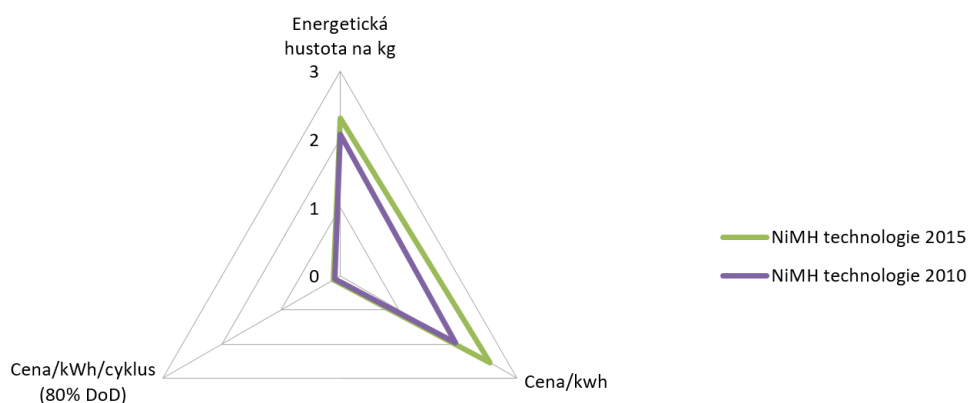
Pro olověnou technologii je bohužel dostupných příliš málo dat. I zde ovšem můžeme vidět pomalý postupný posun k lepšímu. To je vidět i na obrázku 4.2.



Obrázek 3.17: Tento obrázek znázorňuje ohodnocené parametry olověné technologie pro jednotlivé roky.

3.4.3 NiMH technologie

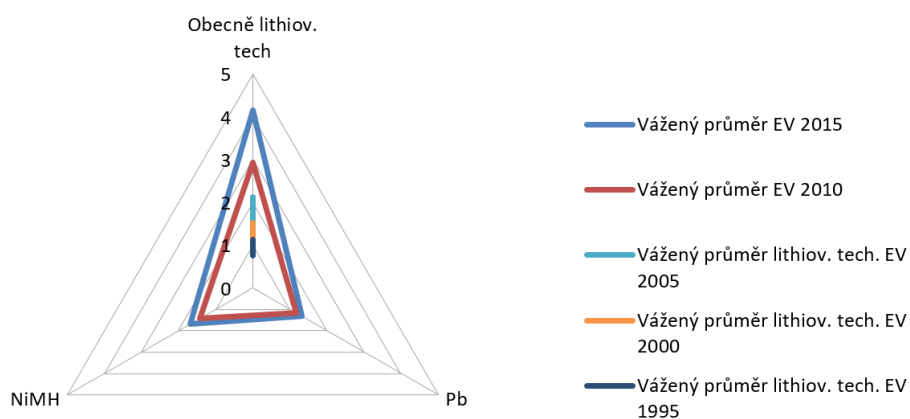
Pro NiMH technologii je také bohužel dostupných příliš málo dat. Vidíme zde ovšem mírně příznivější vývoj než u olověné technologie. Vývoj můžeme vidět i na obrázku 4.3.



Obrázek 3.18: Tento obrázek znázorňuje ohodnocené parametry NiMH technologie pro jednotlivé roky.

3.4.4 Vážený průměr pro elektromobily

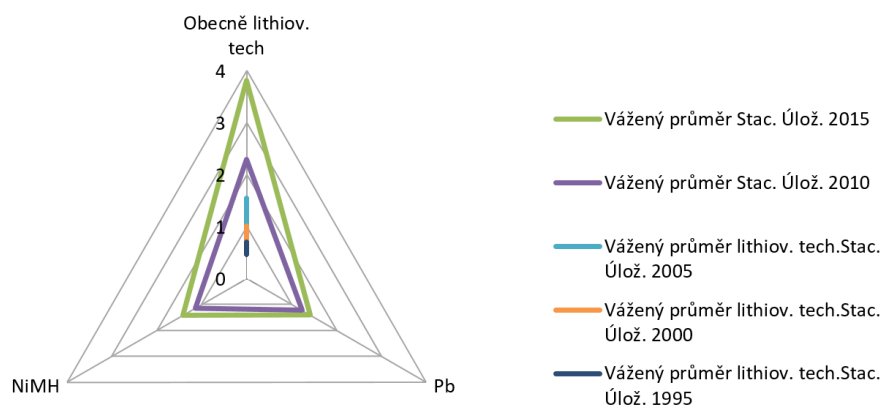
Na tomto obrázku můžeme vidět porovnání bateriových technologií z hlediska váženého průměru pro elektromobily pro jednotlivé roky. Pro rok 2005, 2000 a 1995 se mi bohužel nepodařilo získat data pro NiMH a Pb. Pro tyto roky data chybí. Ve skutečnosti tedy pravděpodobně nejsou nulové. Na obrázku 3.19, stejně tak jako na obrázku 3.20 jsou data pro obecně lithiovou technologii znázorněna, kvůli lepší čitelnosti, čárkami, nikoli tečkami. Přesnému znázornění dat zde potom vždy odpovídá vrchol čárky. I zde můžeme vidět jasný růst potenciálu lithiové technologie pro elektromobily a do budoucna pravděpodobně i pro další mobilní aplikace, jako například letadla.



Obrázek 3.19: Tento obrázek znázorňuje vážený průměr pro elektromobily, jednotlivé technologie a roky.

3.4.5 Vážený průměr pro stacionární úložiště

Stejně jako pro elektromobily, i zde lithiové baterie jasně dominují.



Obrázek 3.20: Tento obrázek znázorňuje vážený průměr pro stacionární úložiště, jednotlivé technologie a roky.

Kapitola 4

Trendy a predikce

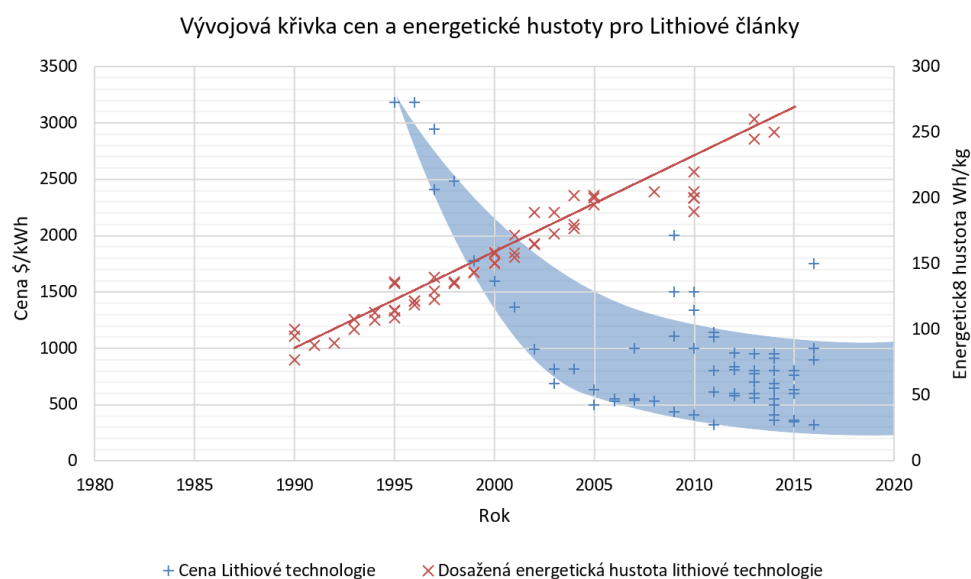
V této kapitole se pokusím popsat historický vývoj určitých ekonomických ukazatelů, ke kterým se mi podařilo, alespoň v omezené míře, získat data (získání a způsob práce s daty je v sekci 3.1). Dále se pokusím odhadnout na jakou cenu se může v dlouhém horizontu dostat obecně lithiová technologie.

4.0.1 Trendy

V omezené míře jsem dokázal sestavit vývojovou křivku cen a energetické hustoty na kilogram pro lithiovou (viz obr. 4.1), olověnou (viz obr. 4.2) a NiMH (viz obr. 4.3) technologii baterií. 1kWh se zde bere jako skutečná kapacita dané baterie, bez jakékoliv rezervy na zvětšení počtu možných cyklů. K sestavení vývojových křivek dalších technologií, jak je můžeme vidět na obrázku 2.1, jsem bohužel nedokázal získat dostatečné množství dat.

Lithiové technologie

Na obrázku 4.1 můžeme vidět vývojovou křivku cen a energetické hustoty obecně pro lithiové články. Data, která jsem použil v tomto grafu, pochází z mnoha zdrojů a jsou tedy značně nesourodá. Dle mého názoru neexistuje dosažitelný způsob zjistit, jak je jaký údaj (zdroj) validní a tedy jaká by mu měla být přisuzována váha. Beru tedy, že každý údaj ať už o ceně nebo o energetické hustotě má stejnou váhu. Fit dat historických velkoobchodních cen za článek jsem provedl pro spodní hranici cen, tedy nejlepší možnost. (Fit je znázorněn jako spodní hranice modré plochy.) To je totiž cena, která se v rešerších, odkud jsem bral data nejčastěji vyskytuje. Z grafu bohužel není vidět, o jaké technologii se přesně jedná. Vidíme ovšem, že cena postupem času nelineárně klesla. A to z hodnoty poloviny 90. let, kdy byla někde u 3000 USD na současných cca 300 USD. To je pokles o 90 % za posledních 20 let. A jak můžeme vidět v sekci 4.0.3, je zde stále prostor pro pokles. Dostáváme se tedy z období, kdy stacionární úložiště a elektromobily byly ve většině případů něco naprosto neekonomického, do období, kdy tyto technologie budou běžným standardem. Podle use case studií od RMI [17] pro stacionární



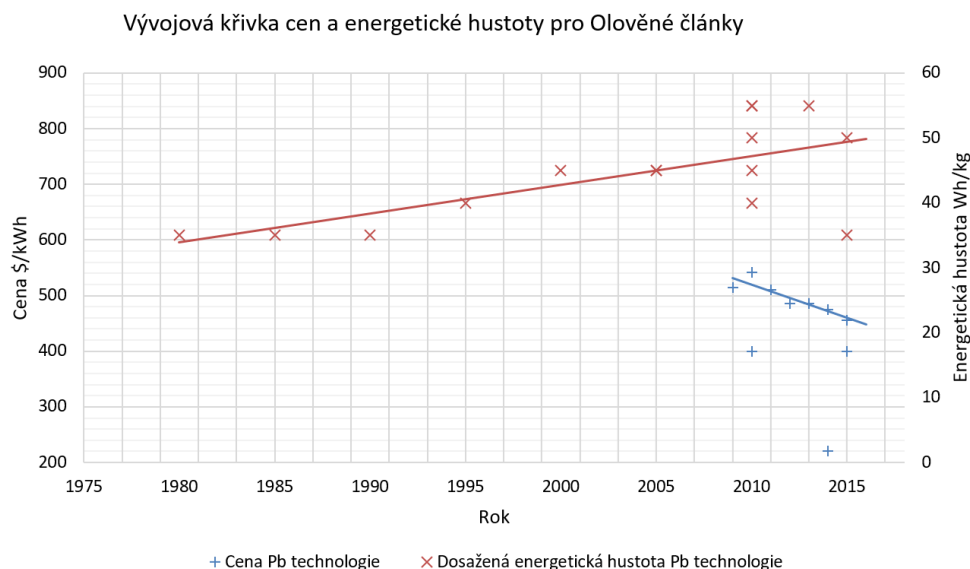
Obrázek 4.1: Vývojová křivka cen a energetické hustoty pro lithiové články.

bateriová řešení ve městech San Francisco, New York a Phoenix by tato řešení byla ekonomicky výhodná už nyní (resp. rok 2014), kdyby ovšem existovala dostatečná legislativa. Rozevírající se modrý kužel v grafu demonstruje fakt postupného (s lety) přibývání technologií baterií, které při vstupu na trh mají vyšší cenu než jejich předchůdci. Resp. jak už zde bylo zmíněno, graf cen zahrnuje obecně lithiové technologie, bez toho aby bylo poznat, jaká cena se vztahuje k jaké technologii. Je to NCA nebo NMC nebo LFP ..? Přibližně od roku 2009 můžeme na obrázku 4.1 vidět data cen, u kterých se zdá, že sestupují z nové a vyšší cenové hladiny vůči cenám z let předchozích. Toto může být vysvětleno tím, že dat bylo po daném období dostupných více, a proto jsou zde znázorněna. Nebo se vyskytla nějaká nová technologie, u které začala postupně cena po roce 2009 klesat až na nynější hodnoty v rozmezí modrého kuželu. Tzn. došlo k nástupu nových lithiových technologií. Těmito technologiemi by mohly být podle obrázku 2.1 například technologie LTO nebo NMC. U těch je uvedena výroba od roku 2008, což by rámcově odpovídalo.

Zároveň s poklesem cen relativně lineárně stoupá i maximální energetická hustota na kg (pozor, tato hustota nutně nekoresponduje s nejnižšími cenami v grafu). Teoreticky by se v grafu měl objevit onen rozevírající se kužel i pro energetickou hustotu. Nicméně ve zdrojích, ze kterých jsem data čerpal, se většinou uvádí maximální energetická hustota pro obecně lithiovou technologii. Výsledkem je tedy lineární závislost a k žádnému „kužlovému efektu“ zde pravděpodobně nedochází. V grafu se dostáváme z en. hustoty kolem 75 Wh/kg na počátku 90. let na dnešní přesahující 260 Wh/kg, což je nárůst o 375 % za poslední cca čtvrt století, a hustota dále roste. Bez větších problémů je tedy možné současné lithiové baterie používat v mobilních aplikacích,

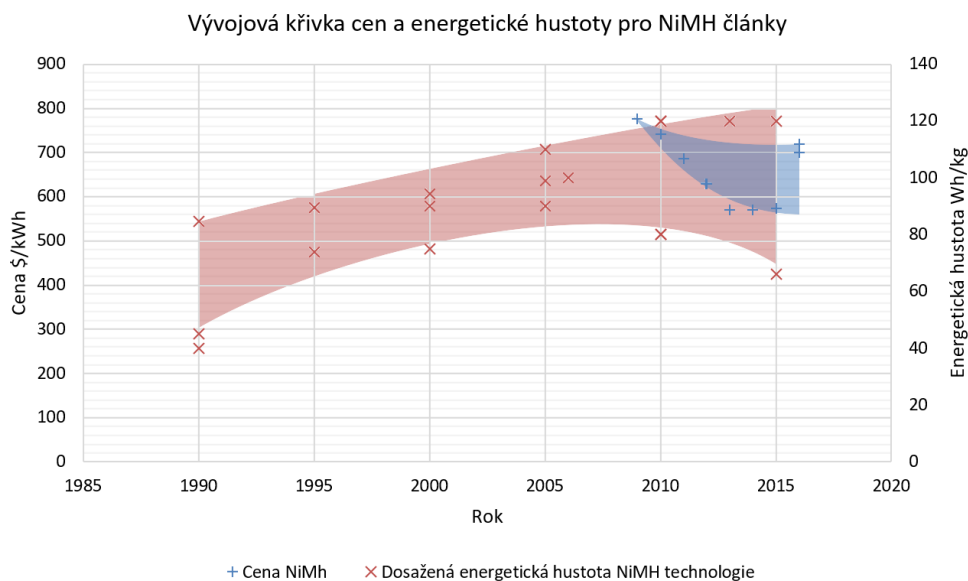
jako jsou například elektromobily. Pro letecký průmysl ještě bohužel není energetická hustota dostatečná, což demonstruje i fakt, že neexistuje jediné sériově vyráběné velké elektrické letadlo. Zatím pouze existují projekty jako je např. E-fan od společnosti Airbus [7].

Olověná technologie



Obrázek 4.2: Vývojová křivka cen a energetické hustoty pro olověné články.

Na obrázku 4.2 můžeme vidět vývojovou křivku cen a energetické hustoty pro olověnou technologii. Bohužel je zde graf značně „chudší“, jelikož je poskládán z menšího množství dat než obrázek 4.1. Můžeme zde vidět, že na rozdíl od lithiové technologie se cena i energetická hustota vyvíjí víceméně lineárně. Toto může být způsobeno vospělostí této technologie, která je známa v podstatě už od počátku 19. století. Obecně, jak jsem psal v kapitole 2, olověná technologie nemůže lithiové z technického a vlastně i ekonomického hlediska absolutně konkurovat. Možná až na použití v „necyklovaných“ záložních zdrojích, jako jsou například UPS. Dle mého názoru se olověná technologie stále používá pouze ze „setrvačnosti“. Pokud bychom chtěli porovnat olověnou technologii s lithiovou podle vývojových křivek, tak lithiová technologie měla už na počátku 90. let (75 a více Wh/kg) větší energetickou hustotu než dnešní olověná technologie (cca 50 - 55 Wh/kg). Od roku 1980 (tj. za posledních cca 35 let) se pro olověnou technologii energetická hustota zvýšila v nejlepším případě o pouhých 64 %, což je v porovnání s lithiovou technologií nicotná hodnota. Cena potom v posledních cca 5 letech klesla z cca 550 USD v roce 2010 na dnešních (rok 2015) v nejlepším případě 400 USD, tzn. o 20 %. Nicméně je nutno říci, že na obrázku 4.2 není dostatek historických cen a tedy



Obrázek 4.3: Vývojová křivka cen a energetické hustoty pro NiMH články.

4.0.3 Predikce vývoje cen lithiové technologie

Jak jsem v této práci opakovaně psal, lithiová technologie baterií se pro aplikace stacionárních úložišť do domácností a pro elektromobily zdá jako jasně nejlepší. Tedy kromě VRB, které má ovšem, jak už jsem psal v kapitole 2.1.1, největší potenciál v jiných oblastech, než jakými se zabývá tato práce. Z tohoto důvodu a z důvodu nedostatku dat pro jiné technologie jsem se pokusil udělat predikci pouze pro obecně lithiovou technologii.

Logika v pozadí metody predikce

Rád bych tu zopakoval některé skutečnosti, ze kterých jsem při pokusu o predikci musel vycházet. Některé z nich už byly v nějaké formě zmíněny dříve.

Nevím, jak moc validní data cen lithiové technologie skutečně mám a nevím, jaké ceny (viz obr. 4.1) jsou pro jaké technologie. Použil jsem nepřeborné množství výhradně internetových zdrojů (rešerše, analýzy... různých společností). Dále neznám metodiku, kterou dané společnosti ve svých rešerších a analýzách došly k závěrům o hodnotách velkoobchodních cen baterií.

Když se znovu zadíváme na obr. 4.1 a podíváme se na skutečný rozptyl

Podle The Motley Fool [13] je v 70 kWh baterii typu NCA v elektromobilu Tesla Model S 11,7 kg lithia, tzn. 0,2 kg/kWh. Visual Capitalist [16] uvádí, že v 70 kWh baterii je 63 kg uhlíčitanu lithného.

Pro kontrolu, kolik lithia obsahuje uhlíčitan lithný? K výpočtu jsem použil Mendělejevovu tabulku prvků a spočítal atomové hmotnosti jednotlivých prvků uhlíčitanu lithného. Procentuální zastoupení lithia v uhlíčitanu lithném:

$$\frac{2 \cdot Li}{2 \cdot Li + C + 3 \cdot O} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 7}{2 \cdot 7 + 12 + 3 \cdot 16} \cdot 100 = 18,9 \% ,$$

kde Li , C a O zastupuje atomovou hmotnost jednotlivých prvků. 18,9 % je tedy 0,9 kg/kWh lithia. Uhlíčitanu lithného je podle těchto výpočtů tedy cca 62 kg v 70 kWh baterii, tedy cca 0,9 kg/kWh. Hodnoty si tedy odpovídají.

Dále je podle Visual Capitalist [16] 54 kg grafitu v 85 kWh baterii typu NCA v elektromobilu Tesla model S. Tedy 0,64 kg/kWh.

Podle [25] vím, že katoda technologie NCA a NMC váží cca 1,8 kg/kWh. LCO váží cca 1,7 kg/kWh. Katoda LMO potom váží cca 2,4 kg/kWh. Dále u výpočtů hmotnosti obsahu jednotlivých prvků v katodách zanedbám lithium, (už je obsaženo v předchozích výpočtech). Použiji tedy jeden údaj obsahu lithia pro technologii NCA pro všechny technologie z obrázku 4.4. Toto je pravděpodobně mírně zkreslující, ale bohužel jsem nepřišel na přesnější metodu. Například v bezpečnostních listech jednotlivých technologií bývají hmotnosti použitých materiálů v rozmezí desítek procent. Dále jsem tedy z těchto údajů dopočítal hmotnosti jednotlivých materiálů pro katody jednotlivých technologií na kWh. Shrnutí můžeme vidět na obrázku 4.5.

Část článku	Použito v:		Tesla Model S	Apple iPhone	Nissan Leaf	Tesla Powerwall	Jedn.
	Technologie		NCA	LCO	LMO	NMC	
	Prvek	Zn.	LiNiCoAlO ₂	LiCoO ₂	LiMnO ₂	LiNiMnCoO ₂	
Katoda	Kobalt	Co	0,3	1,7	0,0	0,6	kg/kWh
	Hliník	Al	0,1	0,0	0,0	0,0	
	Nikl	Ni	1,4	0,0	0,0	0,6	
	Mangan	Mn	0,0	0,0	2,4	0,6	
Celk. hmotnost katody			1,8	1,7	2,4	1,8	
Anoda	Grafit	C	0,6				
Elektrolyt	Lithium	Li	0,2				
	LizCO ₃		0,9				

Obrázek 4.5: Hmotnostní zastoupení materiálů vyjma lithia v katodách jednotlivých technologií na kWh.

Jak tedy můžeme vidět na obrázku 4.5, nejvíce je na 1 kWh potřeba uhlíčitanu lithného, který ovšem obsahuje jenom velice malou část lithia. A to

cca 19%, jak můžeme vidět výše. Celkový obsah lithia v článku se potom pohybuje kolem 2 %. Občas se objevuje tvrzení, že na Zemi není dostatečné množství lithia k přechodu na udržitelnou energetiku a udržitelný transport založený na lithiových úložištích elektrické energie. Toto ovšem není pravda, jak je shrnuto například zde [28].

		2017, Q1					
Část článku	Použito v:		Tesla Model S	Apple iPhone	Nissan Leaf	Tesla Powerwall	Jedn.
	Technologie		NCA	LCO	LMO	NMC	
	Prvek	Zn.	LiNiCoAlO ₂	LiCoO ₂	LiMnO ₂	LiNiMnCoO ₂	
Katoda	Kobalt	Co	12,9	83,5	0,0	28,6	USD/ kWh
	Hliník	Al	0,2	0,0	0,0	0,0	
	Nikl	Ni	14,3	0,0	0,0	6,0	
	Mangan	Mn	0,0	0,0	4,5	1,1	
Anoda	Grafit	C	2,1				
Elektrolyt	Lithium	Li	1,5				
	Li ₂ CO ₃		11,7				
Suma			41,2	97,3	18,4	49,5	
Průměr			51,6				

Obrázek 4.6: Přepočet hmotnosti jednotlivých materiálů katod na USD/kWh podle cen Q1 2017; tedy Co = 48; Al = 1,8; Ni = 10 a Mn = 1,9; C = 3,3 (Q3 2016); Li₂CO₃ = 13 USD/kWh.

Na obrázku 4.6 potom můžeme vidět cenu jednotlivých vybraných materiálů pro výrobu lithiových baterií. Jako nejdražší zde vychází technologie LCO, která je použita například v produktech Apple iPhone. To je způsobeno do velké míry vysokým kolísáním ceny kobaltu. Ten se například v roce 2016 prodával zhruba za polovinu současné hodnoty. V elektromobilech se, dle mého názoru, do budoucna bude uplatňovat hlavně technologie NCA, která má nejvyšší dostupnou energetickou hustotu. A to až 260 Wh/kg. Je samozřejmě také otázkou, jak se budou vyvíjet ceny jednotlivých materiálů, jak bude s narůstajícím objemem výroby baterií poptávka po nich stoupat. Ceny lithia se například za poslední 2 roky více než zdvojnásobily a cena dále roste. Podle [16] investiční bankovní společnost Goldman Sachs předpokládá, že peak cen lithia nastane kolem let 2018, 2019 a potom začne klesat. Potenciál z hlediska lithia má i Česká republika, která má největší zásoby lithia v Evropě. Zásoby se nacházejí u Obce Cínovec na hranicích s Německem. [10]

Při porovnání nejnižší současné ceny za 1 kWh obecně lithiové technologie (viz obrázek 4.1 a obrázek 4.6) je vidět, že zatímco nejnižší současná cena 1 kWh obecně lithiové technologie dosahuje cca 300 USD/kWh, tak materiály, které jsem vzal v úvahu, dosahují v průměru pouze cca 50 USD/kWh. Toto je způsobeno tím, že skutečné články nejsou pouze souhrn jednotlivých materiálů nakoupených za velkoobchodní ceny, ale obsahují další materiály, které zde uvedeny nejsou. V ceně jsou také zakomponovány náklady na vývoj

článku. Dále je potřeba články vyrobit a přepravit. Zde hrají velkou roli výdaje na vyrobení článků s vysokou kvalitou, jaké je u elektromobilů a stac. úložišť vyžadována. Podle [11] tato částka dosahuje až 60% ceny materiálu. Tzn. v tomto případě (pro výše zmíněný průměr) cca 30 USD/kWh. Zde je pravděpodobně také největší prostor pro zlepšení. Dalším faktorem mohou být vysoké marže prodejců. Např. při zjišťování dat cen baterií mi bylo v jedné společnosti řečeno, že někteří výrobci ještě před několika lety měli marži 400% (nikoli tedy pro článek, ale pro bateriový pack) a že i dnes se marže mohou pohybovat kolem 100 % (též pro bateriový pack).

Dle mého názoru tedy do budoucna může cena klesnout velice podstatně. Především díky výrobě baterií ve velkém množství. Jak tomu bude například v továrně Gigafactory 1 společností Tesla a Panasonic s (projektovanou) největší zastavěnou plochou na světě. Už v roce 2016 společnost Tesla tvrdila, že je schopná vyrábět baterie (pravděpodobně bateriové články, nikoli packy) pod hranici 190 USD/kWh [20]. Nyní Tesla tvrdí, že díky Gigafactory 1 je schopná zredukovat cenu o dalších 30 %, tzn. dostat se pod hranici 124 USD/kWh [21] (zde jde pravděpodobně o technologii NCA, s nejvyšší energetickou hustotou). Tyto ceny ovšem nerepresentují ceny na skutečném trhu a proto nejsou na obrázku 4.1 uvedeny. Pokud by to, co tvrdí Tesla, byla pravda, nepovažoval bych mnou spočítanou teoretickou hodnotu ceny za materiál cca 50 USD/kWh v delším horizontu (10 až 20 let) za zcela neuskutečnitelnou i pro celý článek.

Více v [19], [16], [25], [13].

Kapitola 5

Strategie výběru baterií

5.1 Výchozí bod

Jak už bylo řečeno v předchozích kapitolách, tak v současné době lithiové technologie baterií pro uvažované aplikace svými parametry naprosto dominují technologiím ostatním. Dále (viz kapitola 4) je velice obtížné předvídat jejich cenový pokles. Do hry totiž vstupují nejenom technické parametry, ale i politický rozměr. Jako když v roce 2013 Demokratická republika Kongo zakázala vývoz mědi a kobaltu. [12] Dále se objevují nové technologie baterií, zatím spíše na experimentální bázi, jako například lithium-sulfur, sodium-ion... Ty slibují zřetelně lepší parametry. Vytvořit tedy model strategií, které mají být použitelné i v budoucnu, přestože budoucnost je „jedna velká neznámá“ může být poněkud záludné.

5.2 Model budoucích strategií

Doporučení budoucích strategií jsem založil, jako ostatně většinu této práce, na obrázku 2.1 a 3.1. Technické parametry jednotlivých technologií jsou v současné době nějaké. Do budoucna se mohou parametry měnit a zlepšovat, stejně tak preference, resp. koeficienty váhy jednotlivých parametrů. Při hledání budoucí strategie mi tedy jde o hledání budoucího optimálního výsledku pro aplikaci v elektromobilech a ve stacionárních úložištích pro rodinné domy. Tato optima se mohou vzájemně doplňovat. Např. potom co baterii budu 10 let používat jako úložiště elektrické energie v elektromobilu, a její kapacita klesne pod požadovanou mez, mohu ji stále bez problémů použít jako stacionární úložiště v domácnosti. Zde mě totiž poměr energetická hustota ku hmotnosti nebo objemu zajímá mnohem méně. V kapitole 3 jsem při ohodnocení baterií dostal určité výsledky pro jednotlivé technologie baterií. Ty technologie, které dosahovaly nejlepších výsledků, by měly být technologie pro danou aplikaci optimální. Pokusil jsem se najít optimální výsledky pro současnost (rok 2015). Budoucí strategie představují hledání optimálních výsledků budoucích. Systém pro doporučení budoucích strategií

je už tedy vytvořen v kapitole 3. V budoucnu ho lze aplikovat (popřípadě doplnit, upravit, nebo rozšířit) na technologie baterií, mezi kterými se budu rozhodovat.

■ Na co si dát pozor?

Vytváření budoucích strategií se pravděpodobně bude potýkat s podobnými problémy jako vytváření strategie současné. Rád bych zde shrnul základní problémy a postup.

1. Základem dobrých strategií jsou dobrá vstupní data. U neúplných nebo chybných vstupních dat nelze očekávat stoprocentně správné výsledky. To ostatně nelze ani u dat správných. Nicméně dostatečné množství kvalitních dat je prvním klíčem k úspěchu. Jak už jsem mnohokrát avizoval výše, získání kvalitních dat je však extrémně těžký úkol.

Zde je potřeba si dát pozor na data, kde není jasný původ. Dále si je dobré data několikrát ověřit z různých nezávislých zdrojů.

2. Další otázkou je, jaká data jsou jak validní, respektive, jakou bychom jim měli přisuzovat důležitost. Je tedy potřeba si položit otázku, k jakému účelu chci dané bateriové články využívat a jak mi to daný parametr ovlivní? O toto jsem se pokusil v kapitole 3, kdy jsem každému parametru podle dotazníku expertního šetření přiřadil koeficient důležitosti. Dále jsem data parametrů ohodnotil a spočítal vážený průměr podle koeficientů důležitosti. Tento model spočívá v porovnávání technologií baterií mezi sebou, kdy nejlepší výsledek je brán jako referenční. Výsledky jsou tedy relativního charakteru a mohou se v budoucnu měnit s přidáním nové technologie baterií. Nicméně trend ukazatelů (vážených průměrů) by měl zůstat stejný.

Ona validnost dat není nijak intuitivní. Jako dobrý způsob mi přišlo využít znalostí a zkušeností odborníků techniků, které o dané problematice vědí více než já. Ukazatel validnosti může být i grafického charakteru, jako je například na obrázku 3.2. Na tomto obrázku je vidět, že cena/kWh má zcela jiný význam než cena/kWh/cyklus. Podle jednoho parametru by mohla vyjít jako nejlepší technologie olověná a podle druhého lithiová.

3. Interpretace získaných výsledků je také zásadní. I dobré výsledky se dají interpretovat v matoucí formě. Myslím si, že nejvíce intuitivní formou je grafické podání, k jehož porozumění není potřeba žádný zvláštní trénink. O to jsem se také v celé této práci snažil.
4. Budoucí strategie by dále měly zahrnovat sledování trendů jednotlivých ukazatelů. Jak se jaká technologie kam vyvíjí. O to jsem se pokusil v kapitolách 3 a 4. To je asi nejsložitější problematika. Zde vyvstávají

takové problémy, jako např. jak sjednotit nekompatibilní data? Jak z těchto nekompatibilních dat předpovědět budoucí vývoj?

5. Čím jsem se v této práci nezabýval, ale co by budoucí strategie také mohla obsahovat, je politický rozměr dané problematiky. Je nastavena nějaká finanční podpora pro dané technologie a aplikace? Popř. z opačného pohledu, jsou nějaké technologie více zdaněny? Jak se to bude vyvíjet do budoucna? Na jakých regionech je daná technologie závislá? Jsou tyto regiony politicky stabilní? Může dojít k nedostatku surovin?

Nyní to například vypadá, že se světová energetika pomalu ale jistě vydává cestou obnovitelných zdrojů. S tím souvisí podpora pro udržitelné technologie, do kterých se baterie také řadí.

Kapitola 6

Závěr

V této bakalářské práci jsem analyzoval bateriové články pro použití v elektromobilech a domácích stacionárních bateriových úložkách. Práci jsem strukturoval podle jednotlivých bodů zadání do 4 kapitol (vyjma úvodu a závěru).

V kapitole 2 jsem se se pokusil čtenáři poskytnout dostatečný vhled do relevantní technické problematiky baterií. Ústředním motivem této kapitoly je obrázek 2.1, kde jsem graficky porovnával vybrané bateriové technologie. Zde je také poprvé vidět zřetelné rozlišení bateriových technologií na olovené, niklové, lithiové a VRB. Dále je zde vidět vysoká technická nadřazenost lithiových technologií, s výjimkou pro VRB, která má ovšem ne zcela stejné aplikace.

V kapitole 3 jsem vytvořil systém pro hodnocení bateriových parametrů z předchozí kapitoly a jejich grafickou interpretaci. Cílem tedy bylo vytvořit systém, který by čtenáři ulehčil vhled do velice složité problematiky bateriových technologií z ekonomického hlediska. Toho jsem se snažil dosáhnout grafickou a jednoduchou číselnou interpretací kvalit jednotlivých bateriových technologií. K tomu jsem použil obrázek 3.1, „kruhové grafy“ a vážené průměry pro elektromobily a stacionární úložky. Z dostupných dat jsem vytvořil nejenom současnou (rok 2015), ale pro určité technologie i historickou ekonomickou interpretaci daných technologií. Z této kapitoly je zřejmé, že lithiové technologie prochází rapidním vývojem co se ceny a energetické hustoty týče. Tedy jsou čím dál tím vhodnější a použitelnější pro rozsáhlé mobilní, ale i stacionární aplikace.

V kapitole 4 jsem se zabýval trendy cen a energetické hustoty. Přestože jsem vycházel z velice omezených dat, podařilo se mi odhalit některé skryté skutečnosti. Důležitými výsledky jsou „kuželové charakteristiky“ dat. U lithiové technologie reprezentují vstup nových technologií na trh a u NiMH technologie možný pokles energetické hustoty novějších článků z důvodu rozdílných vlastností. Dále je v této kapitole vidět perspektivnost lithiových technologií, stejně tak jako neperspektivnost technologie olovené. V této kapitole jsem

také vytvořil model predikce cen lithiových technologií založený na uvažování z pohledu prvního principu. Výsledkem je, že cena lithiových baterií má stále velký prostor pro pokles.

Téma poslední kapitoly 5 jsem ve velké míře rozebral už v kapitolách předchozích. Resp. jsem v nich vytvořil systém (tedy strategii), aplikovatelný i na budoucí technologie. V této kapitole jsem se zabýval pouze ozřejměním návrhu budoucích strategií. Došel jsem k závěru, že budoucí strategie se velice podobají strategiím současným, a je tedy možné s určitými úpravami použít model vytvořený v této práci. Také jsem zde čtenáře upozornil, na co si je potřeba dát v budoucnu pozor.

Příloha A

Literatura

- [1] *Powerful potential: Battery storage for renewable energy and electric cars.* Climate Council of Australia Limited, 2015.
- [2] *BU-203: Nickel-based Batteries.* http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries, 5 2016.
- [3] *BU-204: How do Lithium Batteries Work?* http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries, 5 2016.
- [4] *BU-210b: How does the Flow Battery Work?* http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_210b_flow_battery, 6 2016.
- [5] *BU-402: What Is C-rate?* http://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate, 7 2016.
- [6] *The unique battery system designed for your home or office.* <https://www.zcell.com/>, 7 2016.
- [7] *Airbus E-Fan, The future of electric aircraft.* <http://www.airbusgroup.com/int/en/corporate-social-responsibility/airbus-e-fan-the-future-of-electric-aircraft.html>, 2017.
- [8] *Akumulátor Panasonic AAA NiMH 750mAh 1,2V Eneloop, blistr 4ks.* <https://www.gme.cz/akumulator-panasonic-aaa-nimh-750mah-1-2v-eneloop-blistr-4ks>, 4 2017.
- [9] *BU-201: How does the Lead Acid Battery Work?* http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries, 2017.
- [10] *Czech Republic Aims To Cash In On The Lithium Boom.* <http://oilprice.com/Energy/Energy-General/Czech-Republic-Aims-To-Cash-In-On-The-Lithium-Boom.html>, 4 2017.

- [23] Molek, T.: *Češi vyvinuli vlastní průtočnou baterii.* <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/cesi-vyvinuli-vlastni-prutocnou-baterii/>, 2016.
- [24] Reddyn, T. B.: *Linden's Handbook of Batteries, Fourth Edition.* <http://accessengineeringlibrary.com/browse/lindens-handbook-of-batteries-fourth-edition>, 2011.
- [25] Renard, F.: *2020 cathode materials cost competition for large scale applications and promising LFP best-inclass performer in term of price per kWh.* https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/eb9b04cd75ee9da4619308dffd78760_0-8.01RenardFabrice.pdf, 5 2014.
- [26] Rose, K.: *Foundation 20 // Elon Musk.* https://www.youtube.com/watch?v=L-s_3b5fRd8&t=4s, 9 2012.
- [27] Vrána, J.: *Ph.D student, VŠCHT.* , 4 2017.
- [28] Wister, W.: *Is there enough lithium in the world to replace all petroleum-cars with battery-electric vehicles?* <https://www.quora.com/Is-there-enough-lithium-in-the-world-to-replace-all...>, 5 2016.