



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



Technologické trendy v silniční dopravě

2. etapa

Směry technologického vývoje v oblasti elektromobilita

Asociace elektromobilového průmyslu
červenec 2018



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



Obsah

Popis směrů možného technologického vývoje	3
Elektrické pohony	3
Elektromotory - konstrukce a použité materiály	3
Řídící jednotky (zlehčování a jiné řízení)	4
Čerpání energie do vozidla	5
Nabíjení - bateriové elektromobily	5
Tankování a distribuce vodíku - vozidla s palivovým článkem	7
Způsob uchování energie ve vozidle	8
Vodík a jeho očekávaný vývoj	8
Lithiové baterie a jejich očekávaný vývoj	9
Setrvačníky a superkapacitory	13
Elektromobilita mění platformu i design vozidel	14
Identifikace vhodného uplatnění nových technologií a přístupů	16
Pohon	16
2.2 Baterie	Chyba! Záložka není definována.
2.3 Nabíjecí infrastruktura	19
3. Závěr	20



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



1. Popis směrů možného technologického vývoje

1.1. Elektrické pohony

Elektrický pohon (dále jen “EP”) v elektrickém dopravním prostředku sestává ze tří hlavních částí: elektromotor, který umožní dopravnímu prostředku dopředný pohyb a regeneraci energie v případě zpomalování; řídicí jednotka, zařízení stojící mezi elektromotorem a řidičem, od něž přijímá povely k jízdě či zastavení a na základě nich komunikuje se systémem pro řízení baterie a čerpá/nechává do ní ukládat energii; úložiště energie, které je v současnosti nejčastěji tvořeno sestavou bateriových článků v tzv. trakční baterii, superkapacity, soustavou vodíkového palivového článku a nádrže na vodík, nebo též setrvačnický. EP sestává z dalších částí, jako například převodovka nutná zejména pro vysokootáčkové motory; pojistky a stykače nebo palubní nabíječka (anglicky On Board Charger, dále jen “OBC”). Všechny tyto komponenty byly od počátku stavby prvních elektromobilů, datující se na druhou polovinu 19. století, na jejich palubě přítomny. Všechny zároveň prošly do dneška významným vývojem, přičemž zejména nedávný průlom v oblasti lithiových baterií, tedy na straně úložiště energie, měl na rozvoj elektromobily vliv naprosto zásadní.

V této kapitole se budeme zabývat stávající úrovní vývoje a směry vývoje každé z klíčových komponent EP.

1.1.1 Elektromotory - konstrukce a použité materiály

Základní směr vývoje elektrických motorů, označovaných odborně jako točivé elektrické stroje, byl určen v závěru 19. století, kdy vznikla konstrukce stejnosměrného (DC) a střídavého (AC) elektromotoru. Jejich iterace v průběhu 20. a počátku 21. století vedly k postupnému navyšování jejich účinnosti, zlepšování odvodu tepla a snižování váhy. Díky digitalizaci ve výzkumu a vývoji, včetně počátku používání vzácných kovů ve formě magnetů



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



při konstrukci některých druhů elektromotorů, došlo zároveň k podstatnému zmenšování jejich rozměrů a váhy. To vedlo k příležitosti postoupit s elektrifikací dopravních prostředků a jiných pohyblivých se zařízení (viz další podkapitola), kde byla dosud elektrifikace z důvodu objemu a váhy původních motorů nemožná, jako např. elektrokola, elektrobuses nebo lodě.

Zvyšování účinnosti a síly za současného zmenšování rozměrů a váhy bylo umožněno díky nasazením materiálů jako vzácných zemin, zejména do neodymových magnetů. To však vedlo k výraznému zdražení těchto vzácných prvků na světových burzách komodit, následnému zdražení motorů a otevírání nových těžebních oblastí, které se často nacházejí v politicky nestabilních regionech. Navzdory zvyšující se nabídce po těchto drahých kovech nestíhá tato pokrývat rostoucí poptávku, což vytváří tlak na výzkum a vývoj nových generací elektromotorů užívajících menší nebo žádné množství vzácných materiálů ve své konstrukci.¹ Podaří-li se tento záměr, elektromotory budoucnosti budou nejen menší a výkonnější, ale také více dostupné, což by se mělo spolu s plánovaným poklesem ceny energie v úložištích a současně nárůstu jejich kapacity projevit v nadále se rozšiřujícím spektru dopravních a jiných prostředků, které budou elektrifikovány.

1.1.2. Řídící jednotky (zlehčování a jiné řízení)

Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, řídicí jednotka je jedno ze základních zařízení elektromobilu, jakýsi prostředník mezi řidičem a elektromotorem: od prvního přijímá povely k jízdě nebo zastavení a druhému tyto příkazy komunikuje povel trakční baterií čerpat anebo naopak do sebe nechat ukládat (též tzv. rekuperovat) energii. Zatímco u malých dopravních prostředků se jedná o celkové výkony v rámci jednotek nebo nízkých desítek kilowatt, v případě dospělých automobilů nebo prostředků hromadné dopravy se jedná o

¹ New Toyota Magnet Cuts Rare-Earth Use - <https://cen.acs.org/articles/96/i9/New-Toyota-magnet-cuts-rare.html> (31.7.2018); Honda Develops Hybrid Motor Without Key Rare-Earth Metals <http://www.autonews.com/article/20160712/OEM01/160719972/honda-develops-hybrid-motor-without-key-rare-earth-metals> (31.07.2018)



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



stovky kilowatt, které tato jednotka neustále reguluje a kvůli existenci odporů, které se následně projevují jako ztráty, musí být odvedeny.

Vývoj na poli řídicích jednotek se, podobně jako v případě elektromotorů, ubírá zejména směrem postupného zmenšování, snižování odporu a následných ztrát (a nárůstem energetické efektivity). Zářným příkladem tohoto zmenšování rozměrů a váhy za současného růstu výkonu a efektivity jsou měniče řídicí jednotky použité ve 2. a 3. generaci prvního celosvětově obchodně úspěšného a rozšířeného hybridního vozidla Toyota Prius. Jak ukazuje video u následujícího odkazu, jakkoliv byla 2. generace řídicí jednotky Priusu, který byl uveden na trh v roce 2003, oproti první generaci z roku 1998 vylepšena, pokrok u 3. generace z roku 2009 byl nebývalý. V rámci pouhých 6 let se obě generace od sebe odlišily až o 90 % změn součástí hybridního pohonu.² O 9 let později, na jaře 2018 Toyota ohlásila 4. generaci inspirovaný nový 2l hybridní pohon. Díky pokroku ve výpočetní technice je řídicí jednotka o dalších 20% menší a 10 % lehčí, než předchozí 1,8 l hybridní pohon. Celá převodovka je potom o 25 % lehčí, než u zmiňovaného 1,8 l pohonu.³

1.1.3 Čerpání energie do vozidla

1.1.3.1 Nabíjení - bateriové elektromobily

Celková výkonnost nabíjecího systému elektromobilu hraje v praxi používání elektromobilu stejně důležitou roli, jako hrála na začátku automobilismu dostupnost a účinnost benzínových pump. V případě bateriových elektromobilů je situace ohledně jejich “občerstvení” na rozdíl od vozidel se spalovacím motorem přesto v jednom aspektu významně odlišná - mohou být jednoduše vybaveny palubním nabíječem umožňujícím jejich nabití z jakékoliv domácí zásuvky. Jakkoliv je takovýto způsob nabíjení zdlouhavý a délka takového nabíjení bude

² Toyota Prius 2009 - Evolution of the Hybrid Synergy Drive -
https://www.youtube.com/watch?v=_iggjsKyq2Y (31.07.2018)

³ 2.0-Liter Toyota Hybrid System (THS II) -
<https://newsroom.toyota.co.jp/en/powertrain2018/th2/> (31/07/2018)



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



kvůli rostoucí kapacitě baterií v elektromobilech narůstat, jedná se o strategickou výhodu těchto vozidel. A to zejména v případě, kdy je domácnost vybavena vlastním nezávislým zdrojem energie, jako je nejčastěji instalace fotovoltaické elektrárny. Bez nadsázky se dá tento zdroj přirovnat ve světě spalovacích automobilů, jako byste na zahradě mohli vyvrtat slabou žílu nikoliv ropy, ale přímo již upravené nafty nebo bezolovnatého benzínu a vozuz přes noc napumpovat nádrž.

Palubní nabíječe elektromobilů pro jednofázové nabíjení (napětí 230 V), jsou již v současnosti poměrně kompaktními zařízeními o velikosti krabice od bot a váhou okolo 8 kg. Vzhledem k všeobecné dostupnosti jednofázových zásuvek jsou jedno a dvoustopé elektromobily tímto OBC standardně vybavovány. Jak již bylo zmíněno výše, výkon takového nabíječe je omezen na nízkých 3,6 kW; při odběru nejvyššího proudu 16 A, častěji se ale z hlediska bezpečnosti odběru používá proud jen 10 A, což vede k nejvyššímu nabíjecímu výkonu sotva $2,3 \text{ kW} - 10 \text{ A} * 230 \text{ V} = 2,3 \text{ kVA}$.

Pokud první sériové elektromobily vybavené lithiovými akumulátory, jako např. Mitsubishi iMiEV představený v roce 2010, disponovaly energií trakční baterie ve výši 16 kWh, pak jejich nabití z nuly do plna s pomocí OBC o výkonu 2,3 kW znamenalo stále stravitelných $16/2,3 = 7$ hodin. Proto se jednofázové nabíjení z nuly do plna dodnes označuje jako “noční”, neboť u prvních vozidel trvalo od podvečerního příjezdu majitele s vozidlem domů do odjezdu následného rána. Hlad po nárůstu energie v bateriích elektromobilů však dává jednofázovým nabíječům morálně zastarat. Již v roce 2011 představený elektromobil Nissan Leaf disponoval trakční baterií o energii 24 kWh, tedy třetinu více, než iMiEV, a jeho plné nabití z nuly tak vyžadovalo necelých 11 hodin. V současnosti co do uložené energie na palubě nejkapacitnější prodáváný elektromobil, Tesla Model S 100 D, by potřeboval na takovéto dobití 100 kWh / 2,3 celkem 43 hodin, tedy necelé dva dny. Tento trend má několik důsledků, v případě vývoje OBC pak zejména snahu zlehčit, zmenšit a zefektivnit OBC tak, aby navzdory pomalosti nabíjení ještě po několika generacích vozidel měl co největší strategický přínos.



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



Hlavní pokrok ve vývoji nabíjecích zdrojů je v současnosti technologie *křemík-uhlík* (anglicky *Silicone-Carbide*, v odborné literatuře tak označováno zkratkou “SiC”), které právě požadované zlehčení a zefektivnění nabíjecích zdrojů OBC umožnily. I v případě venkovních samostatně stojících nabíjecích stanic přináší technologie SiC zdrojů revoluci, byť zde, na rozdíl od zúženého místa na palubě vozidel, není váha ani rozměr zdroje, který je umístěn pevně k zemi, takové téma. Výhoda SiC se zde projevuje zejména u velkých nabíjecích zařízení, jako jsou stejnosměrné DC nabíječe o výkonu >50 kW. Zatímco dosud tyto velké nabíječky často sestávaly z výdejního stojanu držícím nabíjecí kabel a komunikačním panelem pro zákazníka, zatímco výkonová elektronika měničů stála opodál v dvakrát tak masivní skříni, technologie SiC umožňuje, že jednotlivé SiC zdroje se i pro takto velký výkon vlezou do samotného komunikačního sloupku. Příchod technologie SiC ve výkonové elektronice, přesněji nabíjecích zdrojích, tak může vést k rychlejší a méně náročné penetraci silniční sítě rychlonabíjecí infrastrukturou.

1.1.3.2 Tankování a distribuce vodíku - vozidla s palivovým článkem

Vozidla používající palivový článek na vodík jako zdroj energie jsou též elektromobily - spolu s bateriovými elektromobily sdílejí všechny základní položky elektrického pohonu: elektromotor a řídicí jednotku. Nosičem energie je zde vodík, přepravovaný v nádržích ve stlačené formě. Ten je následně v palivovém článku v reakci s okolním kyslíkem přetvářen v energii, která roztáčí elektromotor/-y vozidla.

Limity současné úrovně technologie elektropohonu vozidel s vodíkovým palivovým článkem jako úložištěm energie (dále jen “FCEV” podle anglického *Fuel Cell Electric Vehicle*) je, že kvůli nedostatečně pružné dodávce energie z palivového článku musejí FCEV vozit nemalou lithiovou baterii jako dodatečný zdroj okamžité energie a dále, že palivový článek v sobě nese řadu drahých vzácných kovů, zejména platiny. Tato opět, podobně jako v případě magnetů ze vzácných zemin v určitých elektromotorech nebo vzácných kovech v lithiových bateriích, činí výrobu a následnou koncovou cenu FCEV příliš vysokou pro masové rozšíření.



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



Vyřešení problému nedostatečného výkonu pro akceleraci FCEV mohou přinést nové generace palivových článků, které již nebudou prodlevou v dodávce výkonu zatíženy. Dočasným řešením může být pokrok v konstrukci lithiových baterií nasazovaných jako dodatečný zdroj výkonu FCEV, u kterých se zkoumá konstrukce a chemická složení bez vzácných prvků, a tudíž nižší kupní ceny. Stejně tak navyšování kapacity při současném zachování nebo dokonce snižování rozměrů a váhy baterií povede ke zvýšení efektivity celého pohonu FCEV.

Tlak na výzkum a vývoj palivového článku za účelem snižování množství platiny je poměrně úspěšný - např. automobilka Daimler uvedla, že palivový článek v nové generaci jejich Mercedesu GLC F-Cell používá o 90 % méně platiny, než u předchozího modelu Mercedes B F-Cell z roku 2009.⁴

1.2 Způsob uchování energie ve vozidle

1.2.1 Vodík a jeho očekávaný vývoj

Vnější faktorem limitujícím masový rozvoj FCEV je výroba a distribuce vodíku. Co se výroby týče, nejčastější současná forma jeho získávání je z derivátů zpracování ropy (a s tím spojená opětovná závislost na ropě), jako odpad při výrobě čpavku (tento vodík ale není bez dalšího čištění - další vložené energie - pro použití v FCEV vhodný), anebo ekologicky čistá, ale energeticky záporná (je vloženo více energie, než vodík následně v palivovém článku uvolní) elektrolýza (rozklad) vody. Z těchto tří cest nabízí velký potenciál právě ta poslední. Nevýhodnost elektrolýzy vody skrze vysokou energetickou náročnost lze částečně eliminovat získáním elektrické energie s pomocí obnovitelných zdrojů energie (dále jen "OZE"), kde se nacházejí špičkové přeby výkonu. Oblast špiček je přitom nutné regulovat, protože přenosová síť nemusí být schopna je v daný okamžik pohltnout. Zde se nabízí využít tyto

⁴ Platinum's Fuel Cell Car Bonanza Proves Elusive - <https://www.reuters.com/article/us-platinum-fuelcells-analysis/platinums-fuel-cell-car-bonanza-proves-elusive-idUSKCN1GL1DG> (31/07/2018)



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



výkonové špičky k výrobě vodíku s pomocí elektrolýzy, takže alespoň část této jinak neuskladnitelné energie z OZE je uložena ve vodíku. Voda jako druhý vstupní prvek je přitom na zemském povrchu běžně dostupná (a výsledek reakce vodíku s platinou a kyslíkem v palivovém článku je následně opět voda), což neplatí o ropě, a výsledný vodík je okamžitě dostatečně čistý pro použití v palivovém článku - na rozdíl od vodíku jako vedlejšího produktu výroby čpavku.

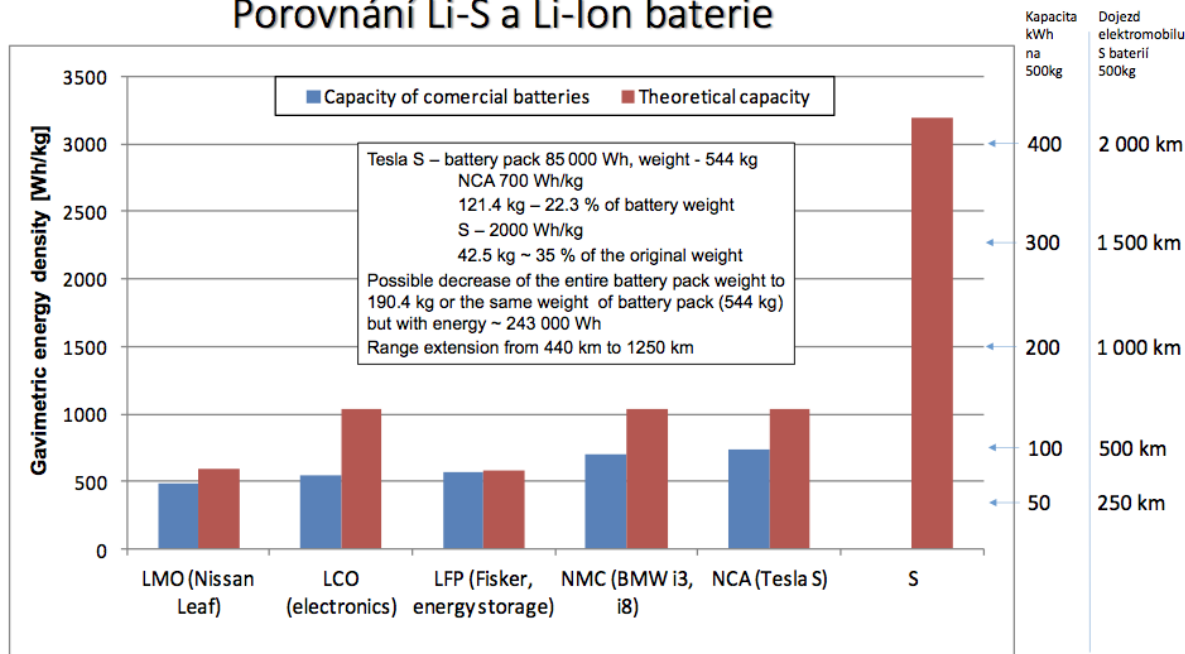
Jakmile bude zdroj vodíku vyřešen, je nutno zajistit ještě jeho *distribuci*, neboť na rozdíl od elektrické energie pro baterie, jej nelze čerpat v domácnostech. Stejně tak ale nelze použít součásti stávající distribuční soustavy uhlovodíkových paliv, neboť vodík jako prvek s nejmenším atomem v tabulce prvků, má zničující účinek na konvenční potrubí a nádrže. Představa výstavby jakýchsi vodíkovodů napříč kontinenty po vzoru ropovodů je tak neproveditelná. Řešením je buďto vyrábět vodík přímo v místě spotřeby, což ale nemusí být vždy možné, nebo čekat na vývoj materiálu, který pokryje stěny potrubí pro distribuci vodíku tak, aby nemusela být průběžně co několik let měněna.

1.2.2 Lithiové baterie a jejich očekávaný vývoj

V současné době se používá několik typů lithiových článků. Jejich kapacity a následné dojezdy v elektromobilu s 500kg vážícím akumulátorem jsou uvedeny v následující tabulce. Modře je vyznačena reálná kapacita tj. schopnost ukládat elektrickou energii získanou při současných technologiích výroby. Červeně je vyznačena teoretická kapacita článku definovaná schopností elektrochemie.



Porovnání Li-S a Li-Ion baterie



Graf: Porovnání elektrochemických typů akumulátorových článků

Akumulátory využívající katodový materiál LMO (LiMn_2O_4) tedy Lithium Mangan Oxid, jsou používány v elektromobilitě společností Nissan. Tato baterie může dosáhnout dojezdu 320 km s boxem baterie vážící 500 kg. Teoretické maximum je 400 km. Nepředpokládá se další vývoj této elektrochemie, kromě využívání nanomateriálů elektrod, které zvyšují povrch elektrod a tím schopnosti rychle se nabíjet a vybíjet vysokými proudy.

Akumulátory LCO (LiCoO_2) tedy Lithium Cobalt Oxid jsou v současné době používány především v elektronice, tedy mobilních telefonech a noteboocích. I když teoretická kapacita je 2x vyšší než vyráběná v dnešní době, nedaří se vyřešit stabilitu při využívání materiálu nad 50%. Nízká životnost těchto akumulátorů 300-600 nabíjecích cyklů, vyhovuje výrobcům elektroniky s dvouletou záruční dobou, ale není vhodná pro elektromobilitu.

Akumulátory LFP (LiFePO_4) tedy Lithium železo fosfátové se v současné době využívají zejména pro stacionární úložiště energie. Jejich reálná energetická hustota není vysoká, kolem 100 kWh/tunu a proto se pro dopravu využívá pouze u nenáročných aplikacích elektrobusů a



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



kolejových vozidel. Jejich výhodou je dlouhá životnost přes 4000 cyklů a bezpečnost. I při mechanickém poškození, provrtání, nebo roztržení, nedojde k jejich hoření ani vypouštění nebezpečné látky.

Akumulátory NMC (LiNiMnCo) tedy Lithium Nikl Mangan Kobalt Oxid, jsou v současnosti nejpoužívanější v dopravě. Jsou používány zejména ve formátu cylindrických - válcových článků 18650 a větších, které jsou serioparalelně spojovány. Používají je například automobilky BMW, VW ale také například elektrobuses SOR nebo ŠKODA ELECTRIC. Jejich prakticky vyrobitelná energetická hustota baterie dosahuje 200 kWh/tunu. Dojezd osobního elektromobilu s baterií 500 Kg může v současné době dosahovat až 600 km. Zlepšením výrobních technologií lze tuto technologii posunout k dojezdu teoretického maxima této technologie na 800 km. Tyto baterie jsou teplotně stabilní podobně jako LFP, přítomnost kobaltu však navyšuje jejich reaktivitu v případě poškození článku.

Akumulátory NCA (LiNiCoAlO₂) tedy Lithium Nikl Kobalt Hliník Oxid, jsou v současnosti vyráběné akumulátory s nejvyšší kapacitou energie až 230 kWh/tunu. Používají se například ve vozidlech Tesla. Baterie o hmotnosti 500 kg s kapacitou 100 kWh umožňuje dojezd až 600 km. Výroba těchto akumulátorů se bude posouvat k teoretickému maximu využívání gravimetrické hustoty katody a vozidla s ním mohou dosahovat dojezdu až 1000 km na jedno nabití.

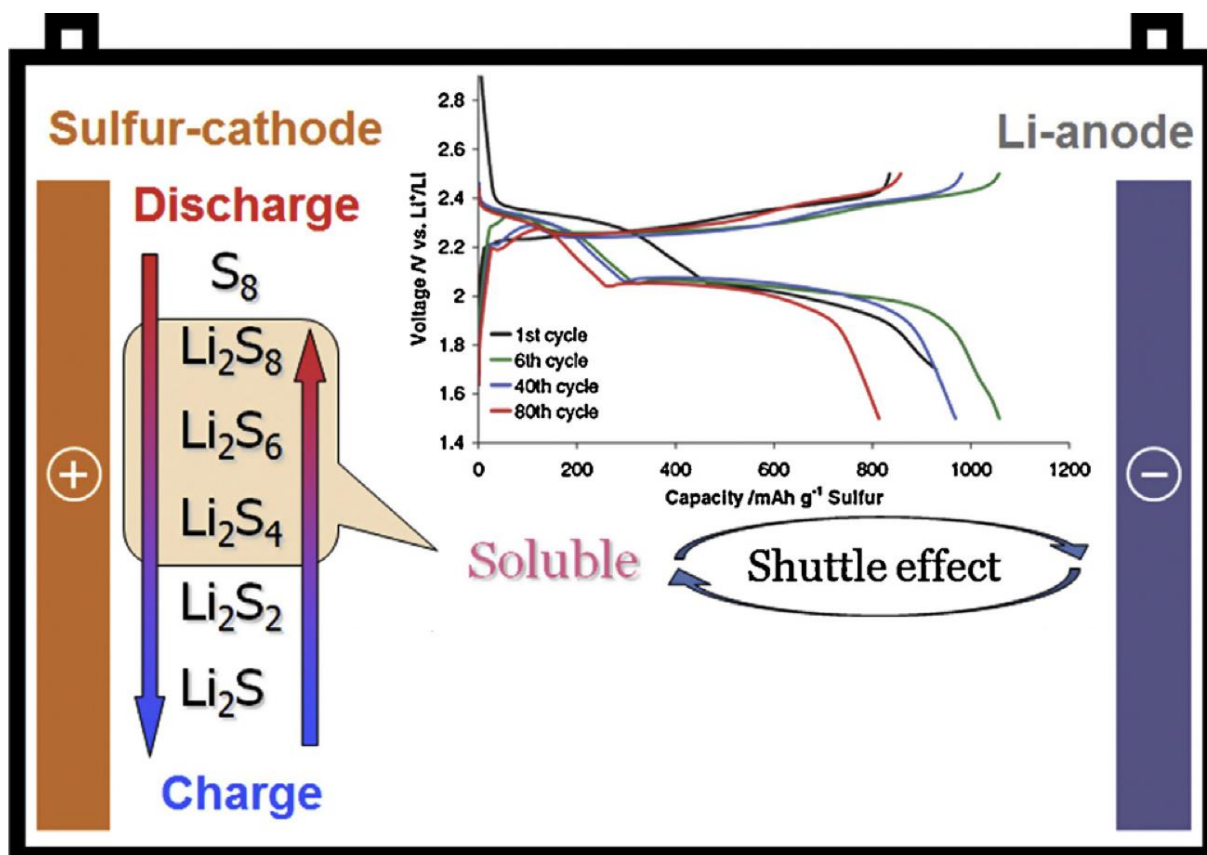
Budoucí výzkum elektrochemie akumulátorů celosvětově pokračuje několika směry. Prvním z nich jsou baterie vysokoteplotní například Sodík-síra, které se již v praxi používaly. Ovšem jejich nutnost udržení vysoké teploty kolem 400°C neslo vysoké energetické nároky na skladování. Vhodné byly pouze na aplikace pro každodenní jízdy.

Dalším směrem vývoje jsou akumulátory Lithium-vzduch. Na jejich rozvoji pracovala například společnost IBM. Uplatnění v automobilech je zatím technicky neproveditelné, protože pro potřebný výkon baterie potřebuje velké množství velmi suchého vzduchu.

Nadějným směrem vývoje jsou vysokonapěťové články, tedy takové, které nemají nominální napětí (potenciál) 3,7 V ale například 5,0 V. Při stejné hodnotě kapacity Ah je proto do nich možné uložit více energie.



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



Nejnadějnějším typem elektrochemie jsou baterie Lithium-síra, na kterých pracuje mnoho vědeckých týmů ve světě. Problémem těchto baterií je zvětšování objemu (dilatace a následné poškození vnitřní struktury) a tím dosažený nízký počet cyklů. Tyto nevýhody se podařilo poprvé překonat v roce 2016 týmu na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně, kde byl tento vynález v roce 2018 patentován. V současnosti se na stavbu prototypové výroby hledá investor. Knoflíkový prototyp baterie z brněnského VUT dosahuje unikátní životnosti přes 600 cyklů. Teoretická energetická kapacita Li-S baterie je 900 kWh/tunu, prakticky se předpokládá dosažení 600 kWh/tunu. Baterie o hmotnosti 500 kg by tedy umožnila dojezd elektromobilů až 2000 km na jedno nabití.

Výhodou baterie je nízká cena síry, kolem 3 EUR/kg oproti ceně $LiFePO_4$ 52 EUR/kg.



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



1.2.3 Setrvačníky a superkapacitory

Setrvačníky a superkapacitory představují v aplikacích dopravních prostředků v současnosti spíše okrajové způsoby ukládání energie. Nabitý setrvačnický je jakousi dětskou káčou rotující v nejvyšších otáčkách, přičemž úmyslným zpomalováním její rotace na principu alternátoru dochází k přeměně kinetické energie v elektrickou. Aby bylo dosaženo co největší účinnosti, umísťují se setrvačníky do vakuových nádob, tedy bez odporu vzduchu při rotaci. Díky jednoduchému principu fungování bylo využití této technologie pro elektromobilitu uvažováno a prototypově nasazováno již v průběhu 20. století, rychlý vývoj technologie zejména bateriových článků na straně lithia však rozvoj této technologie na poli mobility upozadil. Problémem setrvačnicků byla také nechtěná stabilizace kinematiky vozidla v zatáčkách.

Jestliže výhodou lithiových baterií oproti dřívějším chemickým bateriím je jejich energetická hustota a nevýhodou naopak pomalé nabíjení, představují superkapacitory opačný případ. Někdy je nazývají též *“ultrakapacitory”* nebo *“vysokokapacitní kondenzátory”*. Tato elektrochemická úložiště elektrické energie jsou schopna vydávat i ukládat energii řádově vyšším výkonem, než nejvýkonnější lithiové bateriové články, to vše za extrémní životnosti - miliony počtu nabíjecích cyklů. Jednalo by se o ideální úložiště energie pro vozidla - nabíjitelná během sekund, s životností řádově přesahující samotná vozidla. Jejich nevýhodou oproti lithiovým bateriím je však velmi nízká energetická hustota - pokud by měl osobní automobil dosáhnout pouze se superkapacitory energie pro dojezd 30 km, nezbyvalo by v něm kvůli superkapacitorům místo pro pasažéry.

Přesto není potenciál superkapacitorů v dopravě nulový - zejména velká a těžká vozidla disponující vysokou hybnou energií, která se zároveň často rozjíždí a brzdí - např. autobusy městské hromadné dopravy - mohou plně využít jejich potenciálu k pokrytí okamžité špičkové spotřeby. Kombinací více druhů energetických úložišť včetně superkapacitorů se ve svých prototypových hybridních autobusech zabývala např. plzeňská ŠKODA ELECTRIC⁵. Výzvou superkapacitorům zůstává vývoj na poli lithiových

⁵ <https://www.skoda.cz/en/references/hybridbus/?from=prod> (28/7/2018)



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



bateriových článků, kde zejména chemie LTO (*lithium-titanát*) nabízí kompromis mezi tím nejlepším z baterií a superkapacitorů - vyšší energii bateriových článků a životnost a velké nabíjecí/vybíjecí proudy superkapacitorů. Jejich vysoká cena kvůli malosériové výrobě však jejich prudší rozvoj na světovém trhu zatím brzdí.

1.3 Elektromobilita mění platformu i design vozidel

Vedle toho, že elektromobilita nabízí řešení problematiky přímé emisní zátěže z automobilové dopravy, přináší i příležitost zásadních změn co do způsobu konstrukce vozidel tak, jak ji známe po celé 20. století. Jak bylo vyjmenováno v úvodu podkapitoly o elektrických pohonech, základními součástmi elektrického pohonu jsou elektromotor, řídicí jednotka a energetické úložiště. U spalovacího pohonu bychom museli dodat: nasávací a výfukový systém potrubí motoru, nebo samotnou velikost spalovacího motoru jako takového. Spalovací motor s veškerým příslušenstvím je natolik prostorově náročný, že jeho umístění vpředu nebo vzadu karoserie definovalo tvar vozidla již v samotném počátku automobilismu. Tuto situaci zásadně mění elektromotory, které mohou při menším rozměru nabídnout stejný i vyšší výkon. Otevírá se tak cesta k jejich uložení doprostřed mezi nápravou, anebo ještě více pokrokověji, přímo do nábojů kol vozidel.

K podobným změnám může v brzké době začít docházet i zvnějšku vozidel. Cíl zajistit co největší efektivitu vozidel tkví v omezení jejich energetické spotřeby. Významný vliv na spotřebu vozidla je součinitel odporu vzduchu tvaru vozidla. Velký potenciál k dosažení co nejnižšího čelního odporu karoserie skýtá shora zmíněné uvolnění dogmat tvarové konstrukce vozidel skrze elektropohon. Další potenciál ke snížení čelního odporu vozidel spočívá v odstranění zpětných zrcátek vozidel a jejich náhrada zpětnými kamerami. Jakkoliv lze argumentovat, že triviální a tím pádem účinný systém vnějších zpětných zrcátek nemá co do spolehlivosti v porovnání s elektronikou zpětných kamer a displejů ve vozidle konkurenci, potenciál úspory na straně aerodynamiky je takový, že v USA již prošla legislativa, která po roce 2022 umožní zpětná zrcátka nahradit kamerami.



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



Celkově vzato, elektropohon a pokrok ve výpočetní technice slibuje zásadní potenciál, ale i výzvy v konstrukci vozidel. Oproti stavu, jaký známe dnes, lze na konci 21. století očekávat podobné změny v designu vozidel, jako je srovnání dnešních karoserií vozidel s kočáry na počátku století 20.



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



2. Identifikace vhodného uplatnění nových technologií a přístupů

Elektromobilita zasáhne do všech odvětví dopravy, s potenciálem změnit konstrukci samotných vozidel oproti stávajícímu stavu k nepoznání. Vzhledem k tomu, že ke změnám může dojít jak na samotných vozidlech uvnitř i vně, tak v distribučním řetězci jejich paliv v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie, lze bez nadsázky tvrdit, že vozidla na konci tohoto století se budou od nynějšího stavu zásadně lišit. Množství a identifikace všech možných změn je nepřehledná, zejména za předpokladu, že i současný stav technologie se neustále vyvíjí. Přesto nadále platí, že zkušenosti nabité při výrobě dosavadních technologií pohonu mají svou hodnotu. S jejich pomocí bude možné dojít k rychlejšímu a bezproblémovému přechodu z jedné technologie pohonu na druhou.

2.1 Pohon

Podobně jako je tomu u každé nové technologie v počátku jejího tržního uplatnění, i elektromobilita naráží na problematiku vysokých nákladů plynoucích z maloobjemové výroby. Jedná se přitom o začarovaný kruh - zákazníci nechtějí pořizovat technologii, která dosud nedosahuje parametrů té stávající, např. při srovnání okamžitého dojezdu vozidla se spalovacím motorem vůči elektromobilu. Dokud ale nevznikne alespoň nějaký trh s elektromobily první generace, nebudou mít výrobci vozidel ani motivaci ani data pro pokračování prodeje a na vývoj dalších, lepších generací.

V současnosti lze potenciál elektromobilů pro budoucí řidiče definovat ve dvou hlavních oblastech - levný/nenáročný provoz a ekologická přijatelnost. Ze stejných důvodů se ve východoevropských městech zachovala v průběhu 20. století síť tramvajových linek, přestože v západní Evropě a USA tramvaje pod tíhou olejářské a automobilové lobby ustoupily autobusovému provozu⁶. Zájemci o provozování prvních čistě bateriových vozidel

⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Taken_for_a_Ride (28/7/2018)



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



se nově rekrutují ze stejných řad - pokud se má jednat o ekonomickou návratnost a co nejekologičtější provoz v místě jízdy vozidel - jsou jimi dopravní podniky. V návaznosti na to došlo na malém trhu České republiky k zajímavému úkazu v celosvětovém měřítku - od roku 2010 zde postupně existují 4 výrobci elektrických autobusů: SOR Libchavy (od r. 2010), EVC Group (od r. 2011), ŠKODA ELECTRIC (od r. 2013) a EKOVA (od r. 2015). Zájem dopravních podniků je přitom podpořený reálně nižšími provozními náklady, které kompenzují vysoké pořizovací náklady elektrobusesů oproti dieselovým. V případě standardního nekloubového 12m vozidla je to rozdíl okolo 5 až 6 milionů za dieselový vůz oproti 10 až 12 milionům za čistě bateriový.

Výhoda lokálně bezemisního provozu elektrobuse je daná, ekonomickou návratnost zajišťují vysoké denní nájezdy, který je navíc dle grafikonu plánovatelný a nabíjecí přestávky tak lze předem naplánovat. Tím odpadá jeden ze shora zmiňovaných článků začarovaného řetězce elektromobility - elektrobuse jezdí přesně danou ranní a odpolední směnu a mezitím se nabíjí.

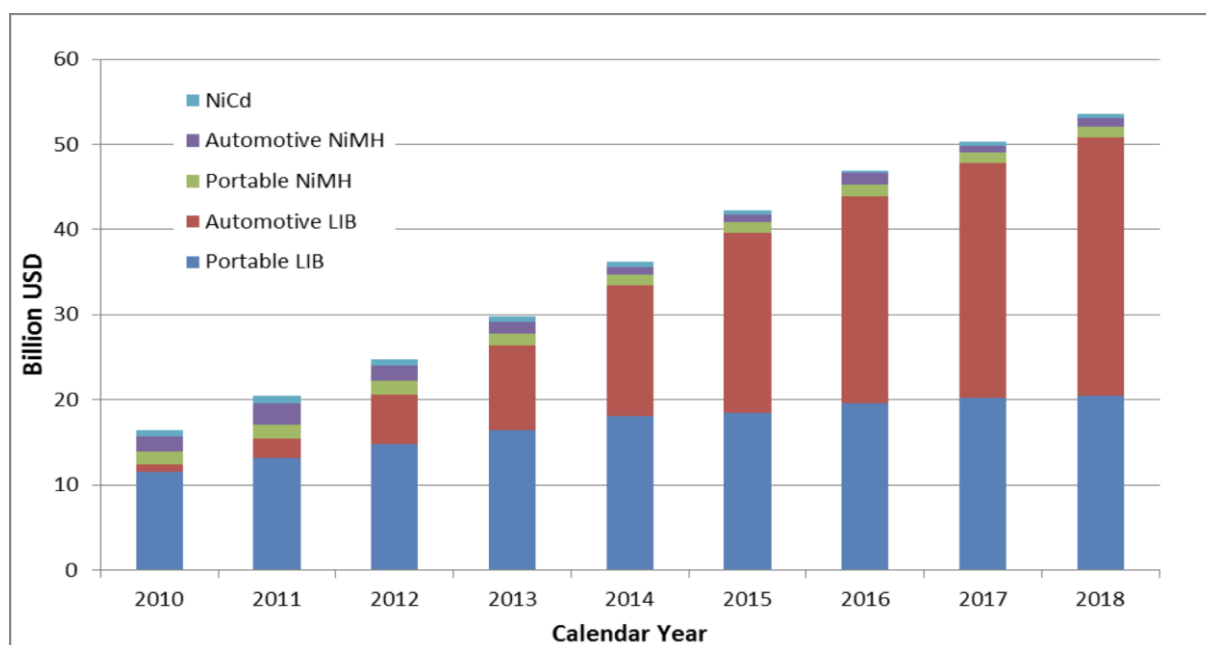
Dalším rozšiřujícím se trhem původně dominovaným diesely je oblast *manipulační a stavební techniky*. I zde, podobně jako v případě hromadné městské dopravy, tedy tramvají a trolejbusů, existuje zkušenost s elektrickým pohonem - např. bateriové vysokozdvizné vozíky používané zejména v uzavřených provozech náročných na bezemisní provoz. Stejně tak je zde určitá směnnost, tedy čas a prostor pro nabíjení. Během několika posledních let se díky pokroku v lithiových bateriích začínají dále objevovat prototypy malých i velkých stavebních strojů na hybridní nebo čistě bateriový pohon. Ještě zajímavější je situace v manipulační technice. Významní výrobci nejen začínají nahrazovat výrobní řady vysokozdvizných vozíků s olověnou baterií novými modely s lithiovou baterií. Zároveň se otevírá trh pro náhradu původních olověných baterií v již prodaných vozících za lithiové, čímž zákazník získává delší životnost, výkon a snížení údržby baterie vozíku na minimum.

Vyjmenovaná ukázka existujících i nových aplikací v MHD a manipulační a stavební technice je důkazem toho, že pokud nové technologie před nástupem masovosti začínají v úzkém výřezu trhu tam, kde nejsou jejich počáteční omezení pro provoz zásadní, rozvoj těchto trhů

následně snižuje výrobní náklady na tuto technologii a zároveň pomáhá uživatelům překonat obavu z užívání něčeho nového.

2.2. Baterie

Světový trh s bateriemi se díky elektromobilitě mění, jak je vidět na následujícím grafu:



Červená a modrá hodnota grafu vyjadřuje obrát za lithiové baterie. Ostatní hodnoty jsou typy baterií. V současnosti se již využívá málo baterií Nikl-kadmiové, Nikl-metal-hydridové, jejichž trh pomalu zaniká.

V roce 2015 byl vyrovnaný trh lithiových baterií pro elektroniku jako např. mobilní telefony, notebooky, aku-nářadí na modré části grafu a pro elektromobilitu na červené části grafu. Tržby za lithiové baterie určené pro elektromobilitu v letech 2016, 2017 již tvořily většinu celosvětového trhu a dá se předpokládat že tato část trhu ještě 500x naroste.

V budoucnosti se očekává výroba post-lithiových baterií, lithium lze u méně náročných aplikací nahradit hořčíkem. Přesto význam a těžba lithia poroste.



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



V České republice prokazatelně existují významné zásoby lithia v minerálu Cinvaldit $K(Li,Fe,Al)_3(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$ na Cínovci a v dalších lokalitách v ČR. Budoucí těžba i využití již vytěžených hald bude pro ČR výhodná jen v případě kompletní produkce od těžby až po baterie na území ČR. Odhad budoucí spotřeby českého lithia závisí na elektromobilitě, avšak i ostatní mobilní výrobky a nářadí budou v budoucnu baterie potřebovat více než dnes.

2.3. Nabíjecí infrastruktura

Nabíjecí stanice se rozšiřují nejen počtem, ale i technologicky. Hlavním tématem nabíjení je vyšší výkon, přičemž základních 50kW se často zvyšuje násobně. To se uskutečňuje paralelním spojováním nabíjecích stanic čili jejich zdrojů tak, aby blízké stanice, které nejsou aktuálně využívány jinými elektromobily, mohly nabíjet společně. Výkony 100 kW až 500 kW, pokud je baterie elektromobilů budou s to vstřebat, mají již tak vysoké proudy, které je nutné řešit novými postupy:

1. Zvyšování napětí. Dnes běžných 400V se zvyšuje na 900V DC. Vyšší napětí, které hodlá využívat například koncern VW/AUDI pro SUV elektromobil, ale není kompatibilní s aktuálně nákladně budovanými 400V stanicemi. Step-down měnič ve vozidle by byl příliš těžký a rozměrný.
2. Vodou chlazené kabely. Obvykle není problematické přenést 500kW výkonu do vozidla z napájecího zdroje do nabíjecího stojanu. Problém může nastat s pohyblivým kabelem a konektorem nástrčky vozidla. Tyto komponenty musí být ručně obsluhovatelny, a proto je omezen průřez jejich kabelu. Omezení průřezu vytváří vyšší odpor a kabel se více zahřívá. Proto se předpokládá nasazení nových vícežilových kabelů, které budou současně vybaveny hadicí, která přivádí a odvádí chladicí kapalinu, například olej nebo vodu.
3. Stanice s baterií. Vyšší nabíjecí výkon je potřeba získat ze sítě. Pokud síť v lokalitě není dostatečná, anebo je v místě zdroj energie např. fotovoltaika nebo kogenerace, je potřeba využít baterie. Ty mohou ukládat energii v době kdy je jí dostatek, nebo je levnější. Nejčastěji se však využívají pro nabíjení vyšším výkonem, než je k dispozici v napájecí síti. Omezení může nastat, pokud se v okamžiku od nabití posledního



EVROPSKÁ UNIE
Evropský fond pro regionální rozvoj
Operační program Podnikání
a inovace pro konkurenceschopnost



vozidla a příjezdu dalšího vozidla nestihne baterie nabít. Stejně tak baterie zvyšuje pořizovací i udržovací náklady nabíjecího místa.

3. Závěr

Mezi lety 2008-2018 proběhla pro sektor dopravy a jejího dalšího směřování zásadní fáze, kterou byl boj různých alternativních pohonů o pozici nástupců spalovacího motoru. V současnosti lze tvrdit, že tento boj vyhrála elektromobilita díky tomu, že v určitých sektorech, jako je hromadná městská doprava, ale i v úzkém segmentu prémiových osobních vozidel, prokázala nejen technologickou, ale též ekonomickou zralost a výhody elektrického pohonu oproti spalovacímu.

Jak bylo zmíněno v kapitole o směrech možného technologického vývoje, možnosti vývoje jednotlivých komponent elektrického pohonu i energetických úložišť je stále na počátku. A to přesto, že tyto komponenty vycházejí v principu z návrhů známých již v závěru 19. století. Zásadní potenciál lze zejména očekávat na poli energetických úložišť elektrického pohonu, a to jak v případě sekundárních článků/baterií (zejména jejich energetická hustota, výkon i životnost), tak vodíku (způsob skladování jako vně i ve vozidle + distribuce). Dále bylo zmíněno, že díky násobně menším rozměrům elektrického motoru oproti spalovacímu lze očekávat zásadní změnu v konstrukci karoserií vozidel - celý pohonný řetězec včetně baterie bude možné umístit do podvozku. Díky rozvoji umělé inteligence pak možná zanikne i pozice předních sedadel coby míst řidiče, neboť vozidla bude možné ovládat na dálku nebo vlastní inteligencí.

Za vhodný trh pro uplatnění těchto technologií lze vidět zejména oblasti, kde stávající omezení elektromobility - nízký dojezd, nízký denní nájezd - nepředstavují omezení. Jedná se zejména o vozidla městské hromadné dopravy (např. elektrobusy) nebo stavební/manipulační techniku. Zářným příkladem funkčnosti takového trhu je zmiňovaná existence 4 výrobců elektrobusů na území České republiky.