



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Pavel Herman

Konstrukce přídatného elektrického pohonu do vozidla s
konvenčním motorem

Diplomová práce

2020



K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Pavel Herman

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – IS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Konstrukce přídavného elektrického pohonu do vozidla s konvenčním motorem**

Název tématu (anglicky): Design of additional electric drive to a vehicle with a combustion engine

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Specifikace jednotlivých komponent pro přídavný elektrický pohon
- Možná řešení zástavby elektromotoru v konvenčním vozidle a jejich výhody a nevýhody
- Typy akumulátorů
- Návrh sestavení přídavného elektrického pohonu, implementace do konvenčního vozidla a následná kalkulace projektových nákladů
- Ověření výhod přídavného elektrického pohonu



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucích práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: First, J., Energetická analýza pozemní dopravy, ČVUT v Praze, Praha, 2014, ISBN: 978-80-01-05664-6
Vlk, F.: Alternativní pohony motorových vozidel, Brno, 2004. ISBN 978-80-23-91602-7
Technická dokumentace vozidla

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Plomer, Ph.D.**
Ing. Josef Mík, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **26. června 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

L. S.

doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Pavel Herman
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....26. června 2019

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mě podporovali během studia. Chtěl bych poděkovat Ing. Janu Plomerovi, Ph.D. za ochotu a velmi cenné rady, které mi velice pomohly během psaní diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mému druhému vedoucímu Ing. Josefu Míkovi, Ph.D.

Velké poděkování patří mé rodině a přítelkyni, kteří mi pomohli v těžkých chvílích a podporovali mě při studiu.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Bc. Pavel Herman

V Praze dne

.....

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Konstrukce přídavného elektrického pohonu do vozidla s konvenčním motorem

Diplomová práce

Květen 2020

Bc. Pavel Herman

Abstrakt

Předmětem diplomové práce „Konstrukce přídavného elektrického pohonu do vozidla s konvenčním motorem“ je koncepční návrh na úpravu vozidla se spalovacím motorem na vozidlo hybridní. V práci je provedeno porovnání spotřeby paliva před a po úpravě vozidla pomocí počítačového softwaru. První část práce popisuje jednotlivé možnosti akumulace energie, uvádí typy elektromotorů používaných v elektromobilitě a je zde věnována pasáž pouze hybridním vozům. Druhá část uvádí samotný návrh přestavby konvenčního vozidla a její finanční analýzu. Poslední částí je samotná simulace a porovnání výsledků.

Klíčová slova

Akumulace energie, akumulátor, elektromotor, HEV, MHEV

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

Design of additional electric drive to a vehicle with a combustion engine

Diploma thesis

May 2020

Bc. Pavel Herman

Abstract

The subject of the diploma thesis “Design of additional electric drive to a vehicle with a combustion engine” is a conceptual proposal for an adjustment of a vehicle with combustion engine to mild hybrid vehicle. Subsequently, the fuel consumption is compared before and after the adjustment vehicle using the computer software. The first part of the thesis describes the possibilities of the energy storage, the types of electric machines used in electromobility and includes a passage about hybrid vehicles. The second part of the thesis contains the proposal of the adjustment conventional vehicle and its financial analysis. The last part is the simulation and comparison of results.

Keywords

Energy storage, battery, electric machine, HEV, MHEV

Obsah

Seznam použitých zkratek	8
Úvod	9
1. Zdroje elektrické energie.....	11
1.1. Formy energie	11
1.2. Zdroje elektrické energie	12
2. Akumulace elektrické energie	14
2.1. Supravodivé indukční akumulátory.....	14
2.2. Superkapacitor	15
2.3. Setrvačnick	16
2.4. Vodík k akumulaci energie	17
2.4.1. Palivové články	18
2.5. Elektromobil jako úložiště energie	19
3. Galvanický článek.....	21
3.1. Olovněný akumulátor.....	22
3.2. Akumulátory na bázi niklu.....	24
3.2.1. Nikl – kadmium akumulátor (Ni-Cd).....	24
3.2.2. Nikl – metal hydrid akumulátor (Ni-MH).....	25
3.2.3. Nikl – zinek akumulátor (Ni-Zn)	26
3.3. Akumulátory na bázi sodíku.....	27
3.3.1. Sodík-síra akumulátor (NaS).....	27
3.3.2. Sodík-nikl-chlorid akumulátor (Na-NiCl ₂)	28
3.4. Akumulátory na bázi lithia.....	29
3.4.1. Lithium-ion akumulátor (Li-ion).....	29
3.4.2. Lithium – polymer akumulátor (Li-pol)	31
3.4.3. Lithium-železo-fosfát akumulátor (LiFePO ₄ = LFP).....	31
3.4.4. Lithium-titan akumulátor (LTO).....	32
3.5. Kov – vzduch akumulátor	33
3.5.1. Hliník – vzduch akumulátor (Al/air).....	33

3.5.2. Lithium – vzduch akumulátor (Li-vzduch)	34
3.6. Redoxní průtokové akumulátory	34
3.7. Srovnání jednotlivých typů ukládání energie.....	35
3.8. Používané akumulátory ve vozidlech.....	37
4. Hnací soustava vozidel	39
4.1. Elektromotor	42
4.1.1. Sériový DC motor.....	42
4.1.2. DC bezkartáčový motor (BLDC)	44
4.1.3. AC synchronní motor s permanentními magnety (PMSM).....	45
4.1.4. Asynchronní třífázový motor (indukční motor)	46
5. Hybridní vozidlo (HEV).....	47
5.1. Sériový hybrid.....	47
5.2. Paralelní hybrid	48
5.3. Stupeň hybridizace.....	49
5.4. Umístění elektromotoru v hnací soustavě.....	50
5.4.1. Integrovaný elektromotor pomocí klínového řemene – P0 (Belt integrated starter generator BiSG)	51
5.4.2. Integrovaný elektromotor na klikové hřídeli – P1	51
5.4.3. Integrovaný elektromotor mimo spalovací motor – P2, P3, P4	52
6. Přídavný elektrický systém pro konvenční vozidla	55
6.1. Příklady přídavných systémů.....	55
6.1.1. Valeo 48 V MHEV systém	55
6.1.2. Continental 48 V MHEV systém	55
6.1.3. Delphi 48 V MHEV systém	55
6.1.4. Bosch 48 V MHEV systém	55
6.2. Návrh přídavného elektrického systému	56
6.2.1. Komponenty přídavného systému	56
6.2.2. Přestavba konvenčního vozidla.....	59
6.2.3. Jízdní režimy.....	60

7. Porovnání spotřeby paliva mezi konvenčním a MHEV	62
7.1. Popis modelů použitých na simulaci	62
7.2. Porovnání spotřeby paliva mezi konvenčním a MHEV.....	63
Závěr	67
Použitá literatura.....	69
Použitá literatura obrázků a tabulek	72
Seznam obrázků.....	75
Seznam tabulek.....	77

Seznam použitých zkratek

EU	Evropská Unie	European Union
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna	Pump Hydropower Storage
CAES	Tlakovzdušné akumulární elektrárny	Compressed Air Energy Storage
EDCL	Superkapacitor	Electric Double-Layer Capacitors
FES	Setrvačnick	Flywheel energy storage
V2G	Vozidlo do elektrické sítě	Vehicle to grid
VRLA	Ventilem řízený olověný akumulátor	Valve regulated lead acid
AGM	Absorbována ve skelné tkanině	Absorbent glass mat
Ni-Cd	Nikl-kadmium	Nickel-cadmium
Ni-MH	Nikl-metal hydrid	Nickel-metal hydride
Ni-Zn	Nikl-zinek	Nickel-zinc
Na-S	Sodík-síra	Sodium-sulfur
Li-ion	Lithium-ion	Lithium-ion
Li-pol	Lithium-polymer	Lithium-polymer
LTO	Lithium-titan	Lithium-titanite
EV	Elektromobil	Electric vehicle
HEV	Hybridní elektromobil	Hybrid electric vehicle
S&S	Start-Stop	Start-Stop
MHEV	Mild hybridní elektrické vozidlo	Mild hybrid electric vehicle
FHEV	Full hybridní elektrické vozidlo	Full hybrid electric vehicle
PHEV	Plug-in hybridní elektrické vozidlo	Plug-in hybrid electric vehicle
EM	Elektromotor	Electric machine
BLDC	Bezkartáčový stejnosměrný motor	Brushless direct current
PMSM	Synchronní motor s permanentními magnety	Synchronous motor with permanent magnet

Úvod

V současnosti si společnost začíná uvědomovat, že dbát na životní prostředí je důležité, a to zejména pro další generace. Do životního prostředí se vypouští mnoho tun škodlivých látek. Snad ve všech sektorech, od průmyslových až po zemědělské, se dostanou do přírody látky, které jí škodí. Když se vymežíme na oblast průmyslu, můžeme si uvést několik zdrojů znečišťování ovzduší. Mezi ty největší patří tepelné elektrárny při výrobě elektrické energie, dále také doprava či samotné domácnosti. Energetika se snaží snížit svůj podíl vypuštěných škodlivin přechodem na jiný způsob výroby elektrické energie. Hlavním cílem je zvýšit produkci z obnovitelných zdrojů, jako je slunce, vítr, voda nebo biomasa. To má ovšem několik překážek. Tou největší je nestálost dodávky energie obnovitelným zdrojem (slunce, vítr, ...) a následné ukládání vyrobené energie do zásobníků.

Jak již bylo zmíněno výše, mezi znečišťovatele patří i samotná doprava. Největším zástupcem na evropském kontinentě pro snižování emisí je v tomhle směru Evropská Unie (EU). Ta řídí a stanovuje hodnotu škodlivých látek, které mohou vozidla do ovzduší vypustit. Jejím hlavním cílem je celkové snížení škodlivých látek vypuštěných do životního prostředí. V posledních letech došlo hned k několika změnám. Automobilky musí splňovat tzv. Emisní normy stanovené právě EU. Jedná se o množství CO₂ na jeden kilometr jízdy, vypuštěné do ovzduší během jízdy. Rok 2020 znamená pro automobilky další zpřísnění, které stanovuje, že flotila vozidel dané automobilky nesmí vypustit v průměru více než 95 g CO₂/km, což přibližně odpovídá spotřebě paliva okolo 4 l/100 km. Za každý gram navíc zaplatí automobilka vysoké sankce. Další a poněkud zásadní změnou je nový způsob měření emisí. Dosavadní proces měření se skládal pouze z laboratorního měření, zatímco nový způsob zjišťování emisí se postupně zavádí do provozu od roku 2017 a je složen ze dvou částí. První část je podobně jako doposud laboratorní zkouška, která má ovšem mnohem přísnější kritéria. Druhou část tvoří jízda v reálném provozu dle určených předpisů. Automobilky tak musely ve velmi krátké době najít vhodné řešení, aby neplatily vysoké pokuty.

Většina automobilek nebyla na takové zpřísnění podmínek připravená. Přísné hodnoty a normy se dotkly zejména vozidel se spalovacím motorem (obzvláště vznětových motorů), a proto se automobilky začaly více zajímat o vývoj alternativních pohonů. Mezi alternativní pohony patří LPG (Liquified Petroleum Gas), CNG (Compressed Natural Gas), vodík, biopaliva nebo elektřina. Zejména poslední zmíněná alternativa se v poslední době objevila v nabídce snad každé automobilky. Elektromobily mají nulové emise, a proto výrazně pomáhají plnit stanovený limit EU. Nulovými emisemi také disponuje vodík. Čistý vodík je ovšem obtížné získat a infrastruktura čerpacích stanic je nedostatečná. Automobilky utrácejí za vývoj na alternativním pohonu miliard eur, které se začínají odrážet i na cenách nových vozidel. Zatím

jsou to právě elektromobily, jejichž počet na silnici přibývá. Nemusí se jednat čistě o elektrické vozidlo, ale může to být i hybridní automobil. HEV kombinuje výhody konvenčního vozu a elektromobilu. Máme několik typů hybridních vozidel, ale cílem těchto vozidel je přinést nenáročné a zároveň smysluplné řešení. Elektromobily mají několik překážek. Tou hlavní je akumulace energie, kdy akumulátory mají vysokou hmotnost a vysokou cenu. Další nevýhodou je výstavba dobíjecích stanic a výroba potřebné elektrické energie pro jejich pohon. Ani jeden z těchto problémů se u hybridních vozidel nevyskytuje, protože mu stačí malé akumulátory, které se plně dobíjí za jízdy.

Cílem této diplomové práce je nalézt řešení, které sníží množství škodlivých látek vypuštěných do ovzduší a nebude finančně nákladné. Bude se jednat o přídavný systém pro konvenční vozidlo, jenž nebude složitý na zabudování do vozidla a nedojde k jeho zásadním změnám konstrukce. Přestavbou vznikne právě hybridní vozidlo.

Tato práce popisuje základní části potřebné pro přestavbu vozidla, zejména pak možnosti akumulace energie a nejpoužívanější typy elektromotorů v elektromobilitě. Práce dále obsahuje samotný návrh přídavného systému a jeho finanční analýzu na přestavbu. Poslední částí je ověření snížení emisí a spotřeby paliva pomocí simulace ve vhodném softwaru.

1. Zdroje elektrické energie

V dnešní době si jen těžko můžeme představit život bez elektrické energie. Používáme ji každý den, i když si to mnohdy ani neuvědomujeme. K nabíjení našich mobilů, notebooků, k uvaření kávy či čaje pomocí rychlovarné konvice nebo k nastartování automobilů. Zkrátka je jednou z hlavních součástí našeho života. Před tím, než si náš mobil můžeme z pohodlí domova opět nabít pomocí elektrické energie, je potřeba vyřešit spoustu procesů a přeměn.

1.1. Formy energie

Elektrická energie, která by byla přímo využitelná pro spotřebiče se v přírodě nevyskytuje, a proto se získává z jiných zdrojů. Dochází k přeměně jiné formy energie na elektrickou energii. Máme několik druhů energií, ale ne všechny formy energie využíváme k výrobě elektrické energie. Nejprve si uvedeme pár příkladů energií, ze kterých můžeme získat energii elektrickou.

Jaderná energie

Jaderná energie vzniká při jaderných reakcích štěpením atomového jádra.

Chemická energie

Chemická energie se uvolňuje při chemických reakcích.

Tepelná energie

Mezi zdroje tepelné energie patří spalování fosilních paliv nebo biomasy.

Solární energie

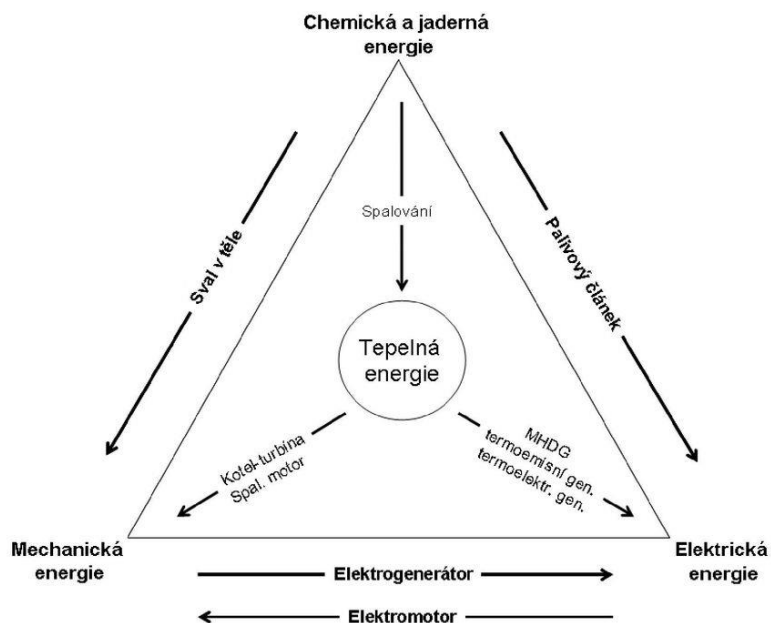
Jedná se o energii ze slunečního záření zachytávanou pomocí fotovoltaických panelů.

Mechanická energie

Mechanická energie se skládá z kinetické (pohybové) a potenciální energie. Zejména kinetická energie má své uplatnění při výrobě elektrické energie. Například proud vody (řeka) nebo vítr mohou být přeměněny pomocí vodní či větrné elektrárny na elektrickou energii.

Následující obrázek č. 1 popisuje nejčastější transformace energií v běžném životě. Z obrázku je patrné, že elektrická energie se dá využít z různých zdrojů energie. Naopak elektrická energie se mění na mechanickou (kinetickou), díky níž se předmět může pohybovat. Názorným příkladem by mohl být elektromobil. Pomocí chemické reakce v akumulátoru

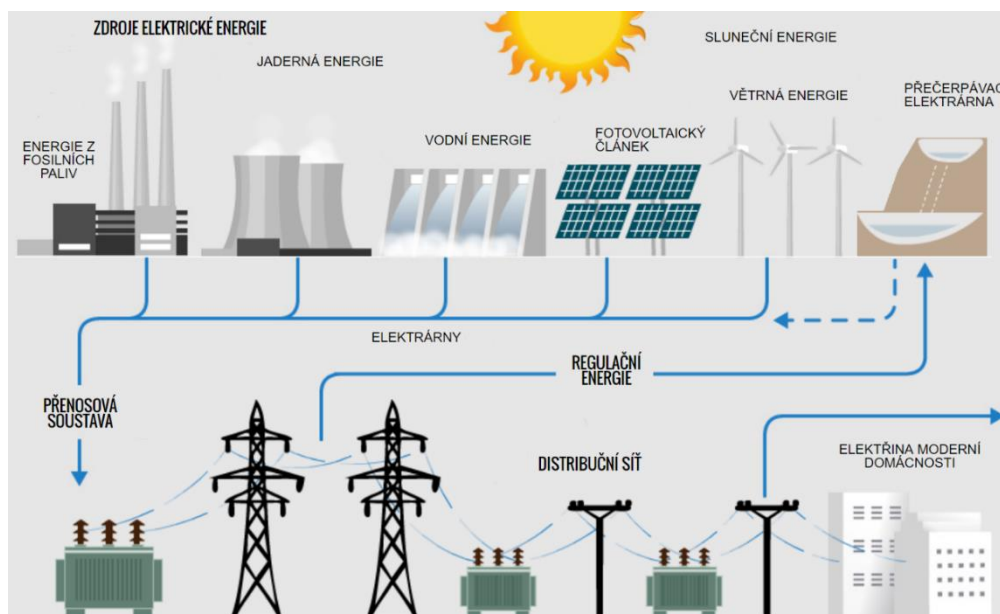
vyrobíme elektrickou energii, která pohání elektromotor a ten následně přemění elektrickou energii na mechanickou energii (kinetickou část). Ta uvede vozidlo do pohybu. [1]



Obrázek 1: Formy a přeměny energií [39]

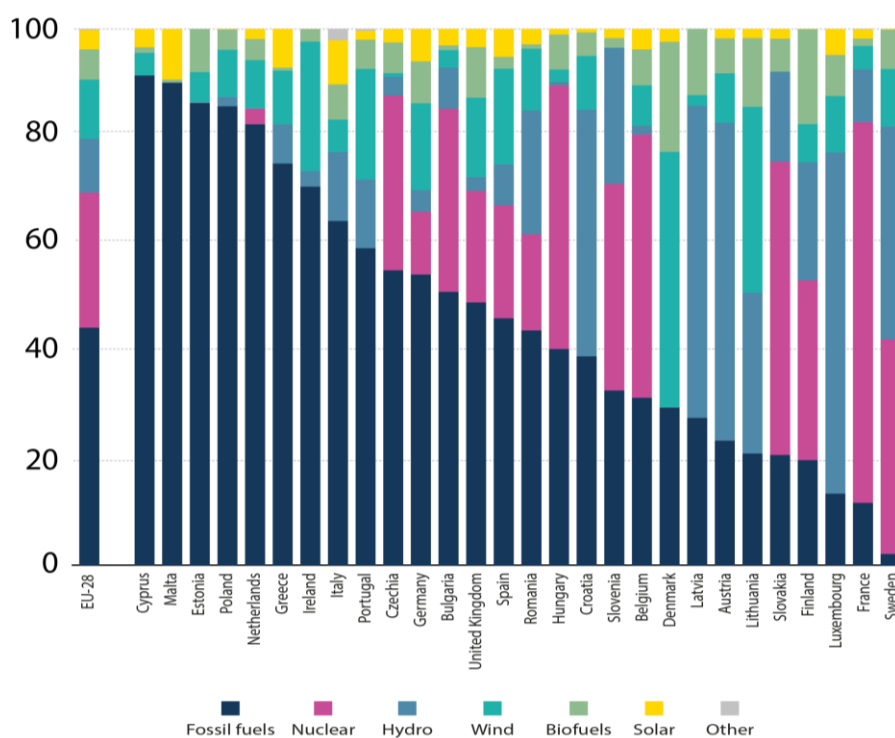
1.2. Zdroje elektrické energie

V našich domácnostech se využívá elektrická energie a my nevíme, z jakého zdroje energie se přeměnila. V elektrárnách se vyrobí elektrická energie a ta se pomocí přenosové sítě dále distribuuje do domácností. Hlavní zdroje energie a její následný přenos je zobrazen na obrázku č. 2.



Obrázek 2: Zdroje elektrické energie [40]

Přeměna jiné formy energie na elektrickou nese s sebou určité výhody i nevýhody. Některý zdroj energie je dostupnější a není závislý na přírodních podmínkách. Jiný zdroj zase nezatěžuje životní prostředí emisemi vzniklých při výrobě elektrické energie. Mezi nejrozšířenější zdroje elektrické energie patří fosilní paliva. Fosilní paliva vznikají miliony let z odumřelých rostlin a těl živočichů. Zástupcem fosilních paliv může být ropa, uhlí nebo zemní plyn. Nevýhodou výroby elektřiny z fosilních paliv jsou právě vysoké emise (např. v uhelných elektrárnách) a jejich neobnovitelnost, tedy vyčerpání zásob. Dalším zdrojem elektrické energie je jaderná energie. Jaderné elektrárny jsou mnohem šetrnější k životnímu prostředí, ovšem jsou více finančně nákladnější na výstavbu a mezi veřejností nejsou příliš oblíbené z hlediska bezpečnosti, obzvláště po havárii jaderného reaktoru v Černobylu. V poslední době jsou na vzestupu obnovitelné zdroje. Ty se snaží nahradit právě fosilní paliva. Příkladem obnovitelných zdrojů je vítr, voda, slunce či biopaliva. Jsou velmi ekologická, ale jejich velkou nevýhodou je časová stabilita, tzn., že jsou závislé na přírodních podmínkách. Podíl jednotlivých zdrojů energie na výrobu elektrické energie je na obrázku č. 3. Jedná se o srovnání zdrojů na výrobu elektrické energie v jednotlivých zemích EU. [2]



Obrázek 3: Výroba elektrické energie podle zdroje [2]

Z obrázku je patrné, že téměř polovina vyrobené elektrické energie v EU pochází z fosilních paliv (fossil fuels) a na zbytku produkce se podílí jaderné (nuclear) a obnovitelné (hydro, wind, biofuels, solar, other) zdroje.

Elektrická energie se nespotřebovává pouze v domácnostech, ale i v jiných oblastech. K největšímu spotřebiteli elektrické energie patří sektor průmyslu, zdravotnictví a školství. Elektrárny samozřejmě předem neví, jaká bude poptávka po elektrické energii, a tak není schopná vyrobit takové množství, které se ihned spotřebuje. Z tohoto důvodu je potřeba elektrickou energii někde ukládat a poté opět využít. Jak je již zmíněno výše, v dnešní době se snaží obnovitelné zdroje nahradit fosilní paliva. Nicméně obnovitelné zdroje nejsou schopné vyrábět elektrickou energii konstantně. Je potřeba mít zařízení, které umožní uchovávat elektrickou energii. V momentě, kdy obnovitelné zdroje budou schopny generovat elektrickou energii, dojde k uskladnění a v době potřeby se opět využije. Je několik možností, jak energii uchovávat. Většina zařízení funguje tak, že v noci, kdy není velká poptávka po elektrické energii, uloží přebytečnou elektrickou energii do jiné formy energie a přes den nebo při vysoké spotřebě se energie pustí zpět do sítě. [3]

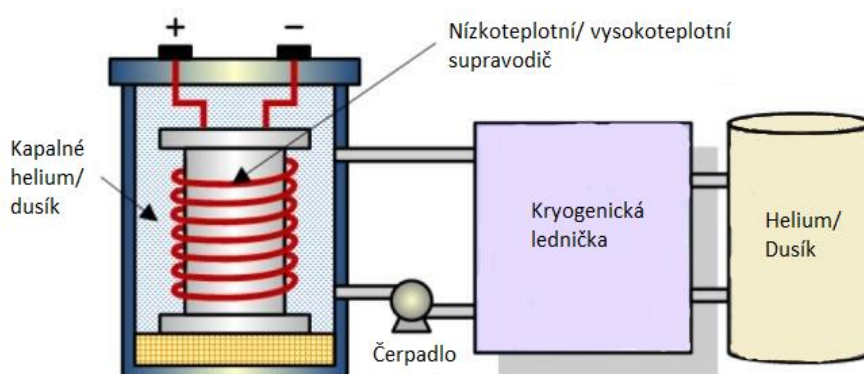
2. Akumulace elektrické energie

Současná doba nabízí nespočet způsobů, jak akumulovat elektrickou energii v různých odvětvích. Elektrická energie se musí uchovávat i v menším měřítku, než je potřeba pro zásobování domácností nebo průmyslových továren. V samotné domácnosti téměř všechny přenosné elektrické spotřebiče využívají k uchování energie baterie (akumulátory), kterých existuje několik typů, viz. dále. Zástupci mechanického ukládání můžou být setrvačníky nebo přečerpávací vodní elektrárny (PVE). Příkladem elektrického uložení energie jsou superkapacitory. Naopak akumulátory nebo vodíkové palivové články vyrábí elektrickou energii pomocí elektrochemických reakcí. Některé způsoby akumulace energie si následně podrobněji popíšeme. Elektrárny využívají k akumulaci energie často přečerpávací vodní elektrárny nebo tlakovzdušné akumulační elektrárny (CAES). Oba zmíněné způsoby akumulace energie fungují na podobném principu. Ve chvíli, kdy je přebytek elektrické energie (zejména v noci), dojde u uložení energie do jiné formy (přečerpání vody, stlačeného vzduchu). Při velké poptávce po elektrické energii se vyrobí elektrická energie, která je využita ke spotřebě. [3]

2.1. Supravodivé indukční akumulátory

Jak je již známo, kovy většinou vedou velmi dobře elektrický proud. Jak dobře vedou elektrický proud je dané především měrným odporem daného vodiče, což má za důsledek ztrátu elektrické energie. Materiál, který má téměř nulový měrný odpor, se nazývá právě supravodič.

Supravodivé vlastnosti mají materiály při velice nízkých teplotách a jsou chlazeny kapalným héliem. Jsou to tzv. nízkoteplotní supravodiče. Jelikož chlazení tímto způsobem není příliš ekonomické, existují i vysokoteplotní supravodiče. Jejich teplota, při které mají supravodivé vlastnosti, je mnohem vyšší, a tak se dají chladit pomocí kapalného dusíku, jak je i znázorněno na obrázku č. 4. Vysokoteplotní supravodiče jsou ovšem křehké materiály a jejich výroba je náročná. Jak již bylo řečeno, supravodič má téměř nulový odpor při vedení elektrického proudu. Do cívky vyrobené ze supravodivého materiálu můžeme pustit proud a ta v sobě uchová proud po odpojení od zdroje určitou dobu. Výhodou je rychlost poskytnutí elektrického proudu a vysoká účinnost, která se pohybuje okolo 95 %. Problémem je získání supravodivých vodičů a jejich vysoká pořizovací cena. [4]

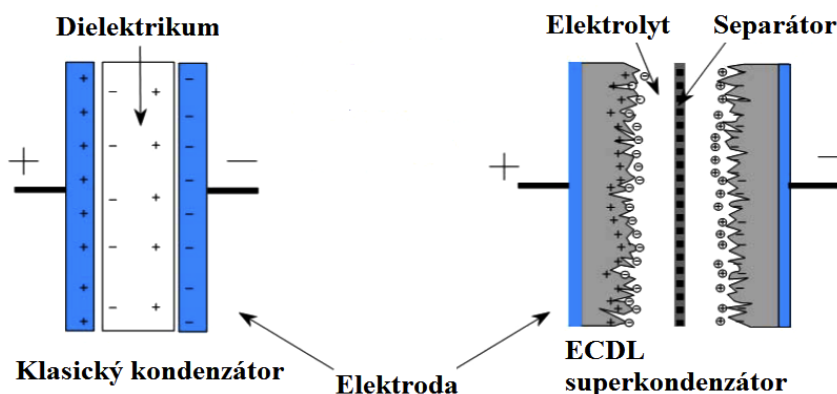


Obrázek 4: Supravodivý indukční akumulátor [41]

2.2. Superkapacitor

Baterie můžeme najít téměř ve všech domácích elektrospotřebičích, v automobilovém odvětví, zkrátka ve všech odvětvích lidské činnosti. Zařízení zvané superkapacitor (Electric Double-Layer Capacitors = EDLC) může v některých případech baterie spolehlivě nahradit. Jako jedno z mála zařízení nemění elektrickou energii na jinou formu a akumuluje energii v elektrostatickém poli. Od klasického kapacitoru se superkapacitor liší několikanásobně vyšší elektrickou kapacitou. Superkapacitor je složen z elektrod, na nichž je nanosena vrstva uhlíku, která zvyšuje kapacitu, viz obrázek č. 5. Elektrody jsou ponořené v elektrolytu. Zatímco jedna elektroda přitahuje záporně nabitě ionty, druhá elektroda přitahuje kladně nabitě ionty. Aby nedocházelo k elektrickému zkratu, nachází se mezi elektrodami dielektrikum (separátor). Superkapacitor neslouží k dlouhodobému uchování energie, ale má velké uplatnění při krátkodobých výpadech energie. Jeho velkou předností je dlouhá životnost, kdy se mnohdy uvádí i nekonečný počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, vysoký výkon a především rychlost nabíjení. Účinnost, dosahující téměř 95 %, patří také k jeho výhodám. Naopak nevýhodou je malý měrný výkon, lineární pokles napětí při vybíjení a nízké nominální napětí, které se dá ovšem vyřešit zapojením několika superkapacitorů do série. Superkapacitory našly své

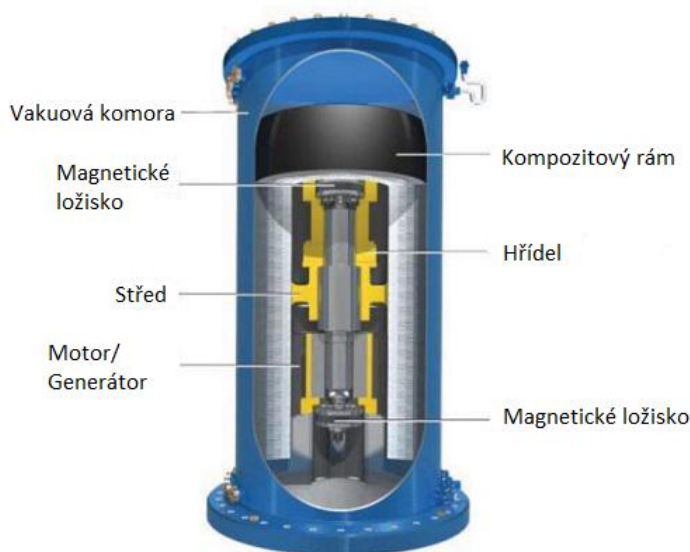
uplatnění i v automobilovém průmyslu, zejména u hybridních vozidel. Dokážou zachytit velké množství energie při rekuperaci a opět ji využít při akceleraci. [5]



Obrázek 5: Superkapacitor [42]

2.3. Setrvačnick

Podobně jako superkapacitor, tak i setrvačnick (Flywheel energy storage = FES) se využívá zejména v situacích, kdy je potřeba rychlé nabíjení a schopnost dát velký výkon v krátkém čase. Jedná se o situace, při časově krátkých výpadech v rozvodné síti, které mohou způsobit problémy. Setrvačnick ukládá přebytečnou energii v podobě kinetické energie, což představuje otáčející se hmota rotoru. Setrvačnick pracuje na základě dvou fyzikálních veličin, a to momentu setrvačnosti a úhlové rychlosti. Množství energie (E), které je setrvačnick schopný uložit, je přímo uměrné momentu setrvačnosti (I) a kvadrátu úhlové rychlosti (ω) ($E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$). Z tohoto tvrzení plyne, že čím rychleji se bude setrvačnick otáčet, tím více energie nám může poté poskytnout. Setrvačnick přitom musí překonat dva základní odpory, odpor tření a odpor vzduchu. Moderní setrvačnicky umí oba z těchto odporů téměř minimalizovat pomocí magnetických ložisek a prostředí, kde se pohyblivá část setrvačnicku otáčí, konkrétně ve vakuu. [6]



Obrázek 6: Setrvačnick [43]

Podrobný popis setrvačnicku je zobrazen na obrázku č. 6. Nabíjení setrvačnicku probíhá nejčastěji pomocí elektromotoru, který nejprve roztočí rotor setrvačnicku a ve chvíli, kdy je potřeba elektrickou energii získat zpět, tak elektromotor funguje jako generátor a energii čerpá ze setrvačnicku zpět. Výhodou, kromě již zmíněných faktorů, je navíc životnost a vysoká účinnost. Nevýhodou je měrná hustota energie a také jejich váha. Podobně jako superkapacitory jsou setrvačnicku využívány i v dopravních prostředcích. [6]

2.4. Vodík k akumulaci energie

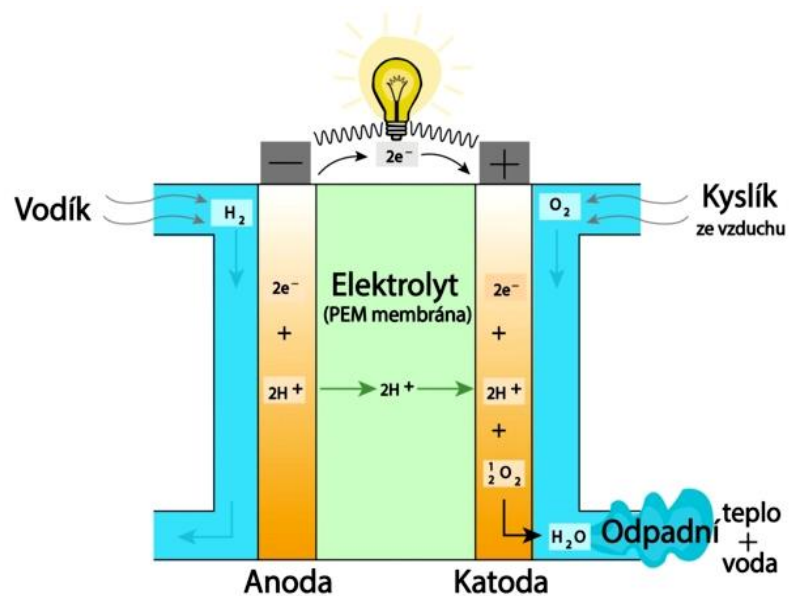
Vodík a palivové články jsou velice rozsáhlé téma samo o sobě. I přes několik problémů se označuje vodík jako palivo budoucnosti. Svoji oblíbenost si získal především nulovými emisemi, protože jeho spalováním vzniká pouze vodní pára. Další přednost vodíku je trojnásobná specifická energie (Wh/kg) oproti benzínu či nafty. Vodík patří k nejrozšířenějším prvkům na Zemi i ve Vesmíru, bohužel se až na výjimky (sopečný plyn) nachází všude ve sloučeninách, např. ve vodě. [7]

Čistý prvek jako vodík se dá získat několika způsoby. V dnešní době převládá výroba čistého vodíku pomocí fosilních paliv, což není šetrné k životnímu prostředí. Jedná se o tzv. parní reformování zemního plynu. Tento proces probíhá při vysoké teplotě a tlaku, kdy metan (část zemního plynu) reaguje s vodní párou. Výstupem této reakce je oxid uhelnatý, oxid uhličitý a právě vodík. Pomocí konverze reaguje oxid uhelnatý opět s vodní párou a vzniká tak další oxid uhličitý. Na 1 kg vodíku se vyprodukuje 7 kg oxidu uhličitého. Dalším více ekologickým způsobem získávání vodíku je elektrolýza vody. Jedná se o proces, kdy do vody ponoříme dvě elektrody (katodu a anodu) a necháme vodou protékat stejnosměrný proud. Následně dojde k reakci a k rozštěpení vazby mezi vodíkem a kyslíkem. Účinnost je velmi nízká, protože je k reakci potřeba velké množství elektrického proudu. Vyšší účinnosti při elektrolýze lze dosáhnout zvýšením teploty na 600 – 900 °C. Také se na elektrody často nanáší tenká vrstva platiny nebo iridia, což vede k rychlejší reakci na elektrodách, ale zároveň naroste i cena elektrolýzy. V dnešní době se podařilo získat podobné výsledky i s nanovrstvou železa či niklu. Zvýšení účinnosti se dá docílit také použitím elektrické energie z obnovitelných zdrojů. [7]

Vodík je lehký plyn, který je velice nestabilní a se vzduchem tvoří hořlavou až výbušnou směs. Má velmi malou měrnou hustotu a jeho molekuly jsou natolik malé, že mohou reagovat s mnoha materiály. Všechny tyto aspekty je potřeba brát v úvahu při skladování vodíku. Vodík se dá skladovat v plynném i kapalném skupenství. V plynném skupenství se uskládňuje v ocelových nádobách při tlaku 350 barů. V kapalném skupenství se skladuje při teplotě – 256 °C ve vícevrstvých nádobách. Je možné také skladování vodíku v hydridech. Vodík se absorbuje do kovového materiálu, přičemž dojde k úniku tepla, a naopak při desorpci se musí teplo dodat a vodík se z materiálu uvolní. [8]

2.4.1. Palivové články

Jedná se o zařízení nacházející své uplatnění zejména v automobilovém průmyslu u elektromobilů. Jsou alternativou pro akumulátory a v budoucnosti je jim předpovídaná velká popularita. Palivový článek za přítomnosti paliva, nejčastěji vodíku a kyslíku, vytváří elektrickou energii, teplo a vodu, tudíž nevznikají žádné škodlivé látky. Palivový článek je složen ze dvou elektrod oddělených elektrolytem. Na anodu je přiveden vodík a na katodu kyslík. Na anodě reaguje s katalyzátorem vodík a vznikají elektrony a kladně nabitě ionty (kationty). Na katodě dochází k redukci kyslíku a vznikají anionty, které se slučují s kationty a vzniká voda. Schéma palivového článku je na obrázku č. 7. Reakce na elektrodách probíhají pomalu, proto vzniklý elektrický proud je malý. Urychlení reakcí na elektrodách lze dosáhnout zvýšením teploty nebo použitím katalyzátoru z drahých kovů, což zároveň zvyšuje plochu elektrod. Palivový článek je schopen dát 0,6 – 0,9 V a pro dosažení vyššího napětí se palivové články zapojují do série. [11]



Obrázek 7: Palivový článek [44]

Máme několik typů palivových článků, které se dělí na základě použitého elektrolytu. Základní typy palivových článků jsou uvedeny v tabulce č. 1.

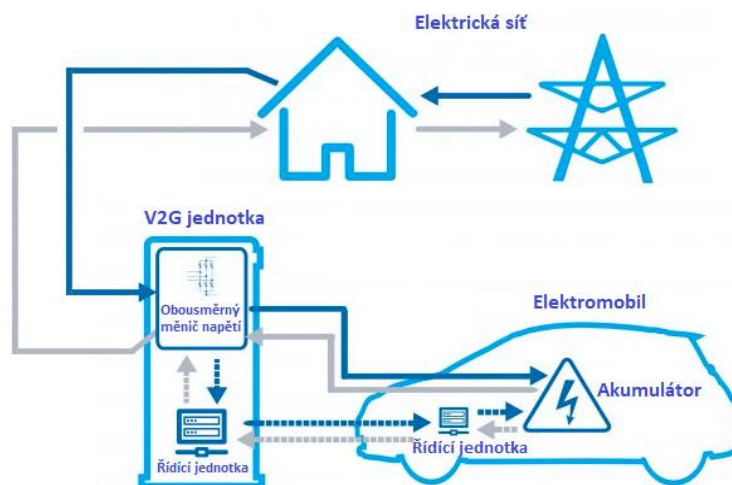
Tabulka 1: Typy palivových článků [45]

Druh palivového článku	Použití	Teplota, účinnost	Výhody	Nevýhody
S polymerní membránou (PEMFC)	Automobilový průmysl, mobilní zařízení	50 – 100 °C 35 – 60 %	Rychlý náběh, dlouhá životnost	Potřeba vysoce čistý vodík, složitá regulace teploty
Alkalický (AFC)	Ve vesmíru, vojenství, doprava	90 – 100 °C 60 %	Nízká cena, vysoká rychlost reakcí, typ katalyzátoru	Citlivé na znečištění paliva a okysyčovačla
S taveným uhlíčanem (MCFC)	Pro výkonné zařízení	600 – 700 °C 45 – 50 %	Více typů paliva a nemusí být čistý vodík	Vysoká teplota, krátká životnost
S kyselinou fosforečnou (PAFC)	Pro střední až vysoce výkonné zařízení	150 - 200 °C 40 %	Snáší nečistoty v palivu, kogenerace	Drahé katalyzátory
S tuhými oxidy (SOFC)	Pro střední až vysoce výkonné zařízení	700 –1000°C 60 %	Bez nároků na palivo, typ katalyzátoru, vysoká účinnost	Vysoká teplota, konstrukční materiály
Metanolové (DMFC)	Mobilní zařízení	40 – 60 °C 20 %	Kompaktní, cena	Účinnost, pomalá odezva

2.5. Elektromobil jako úložiště energie

V koncepci Smart City je jednou z možností uložení přebytečné energie a poté opět její využití, sám elektromobil. Tento proces využívání vozidel pro uchování energie se označuje jako V2G (vehicle to grid – vozidlo do elektrické sítě). Tato idea předpokládá, že nejvíce vozidel se využívá pouze na cestu do a ze zaměstnání a ve zbývajícím čase vozidlo stojí. V době, kdy bude největší požadavek elektrické energie, budou samotná vozidla energii odevzdávat do elektrické sítě a při přebytku energie se naopak budou vozidla z ní dobíjet. Řidič vozidla si navolí v kolik a kam s vozidlem pojedete a systém vše vypočítá tak, aby mu zůstalo dostatek energie na cestu. Jedná se o poněkud velice složitý systém, který najde své uplatnění, jestli

vůbec najde, v daleké budoucnosti, i když automobilka Nissan na této myšlence akumulace energie už pracuje. Základní schéma V2G je na obrázku č. 8. [3]



Obrázek 8: V2G technologie [46]

3. Galvanický článek

Pojem galvanický článek označuje velice rozsáhlou skupinu akumulace energie, a proto se jí budeme zabývat samostatně v této kapitole. Jedná se o chemický zdroj elektrické energie a můžeme ho nalézt v každé domácnosti, ve spotřebičích, které se dají přenášet nebo ve vozidlech. První galvanický článek byl sestaven na začátku 19. stol. a nesl jméno jeho výrobce, Voltův článek. Jeden galvanický článek se nazývá monočlánek. Mnohem častější se setkáváme s názvem baterie. Baterie je sériové či paralelní zapojení několika článků. Dále můžeme galvanické články dělit na primární nebo sekundární. Primární neboli neobnovitelné články jsou pouze na jedno použití, což znamená, že se nedají znovu nabít. Sekundární, častěji nazývané akumulátory jsou obnovitelné, a tak se dají dobít a znovu používat. Primární články se používají v zařízeních s nízkým odběrem proudu. Jejich výhodou je především nízké samovybíjení a cena. Příkladem primárního článku může být uhlík – zinkový článek, alkalický primární článek nebo lithiový článek. V dnešní době se primární články nahrazují akumulátory. Skupina sekundárních článků je poněkud rozsáhlejší, a proto si jednotlivé články podrobněji popíšeme. [10]

Abychom mohli jednotlivé akumulátory mezi sebou porovnávat a určit jejich vlastnosti, je potřeba si zvolit parametry na základě kterých budeme schopni určit jejich výhody a nevýhody a mezi sebou porovnat.

Jmenovité napětí [V (Volt)]

Jedná se o napětí často uvedené na článku. Toto napětí se liší podle typu článku. Při sériovém zapojení můžeme napětí sčítat. [11]

Kapacita [Ah (Ampér hodina)], [C (Coulomb)]

Jednotkou SI kapacity je coulomb (C), ovšem v praxi se používá Ah ($1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$). 1 Ah představuje konstantní dodání proudu 1 ampéry do obvodu po dobu 1 hodiny. Kapacita je ovlivněna vnitřním odporem samotného článku. Při paralelním zapojení se může kapacita článků sčítat. [11]

Energie uložená v článku [Wh (Watt hodina)]

Energie uložená v článku závisí na napětí a kapacitě. Pro porovnání článků mezi sebou slouží tato hodnota ve [Wh], která se získá vynásobením jmenovitého napětí [V] a kapacity [Ah]. [11]

Měrná energie [Wh*kg⁻¹]

Je to množství energie uložené v jednom kilogramu článků. Tato veličina popisuje, jak velkou hmotnost bude mít akumulátor, abychom dostali požadovanou energii. [11]

Hustota energie [Wh*m⁻³]

Udává množství energie uložené v objemu baterie 1 m³. Tato veličina nám říká, jak velká baterie bude potřeba, abychom měli požadovanou energii. [11]

Měrný výkon [W*kg⁻¹]

Měrný výkon nám říká, jaké množství energie získáme z jednoho kilogramu akumulátoru. Baterie, s velkou měrnou energií a malým měrným výkonem dokáže uchovat velké množství energie, ale poskytne ji velmi pomalu. [11]

Samovybíjení

Každá baterie se postupem času sama vybíjí a musí být dobíjena. Míra samovybíjení závisí zejména na typu článku nebo teplotě uskladňování. [11]

Účinnost

Poměr mezi energií vloženou do baterie (nabití) a množstvím energie získanou z baterie. [11]

Životnost baterie a počet vybíjecích cyklů

Životnost baterie se udává pomocí počtů cyklů. Jeden cyklus znamená nabití a vybití článku. Počet cyklů záleží na typu baterie nebo použití baterie. [11]

3.1. Olovněný akumulátor

Nominální napětí článku = 2 V

Měrná energie = 35-50 Wh*kg⁻¹

Měrný výkon = 250 W*kg⁻¹

Hustota energie = 55-95 Wh*l⁻¹

Účinnost = 80 %

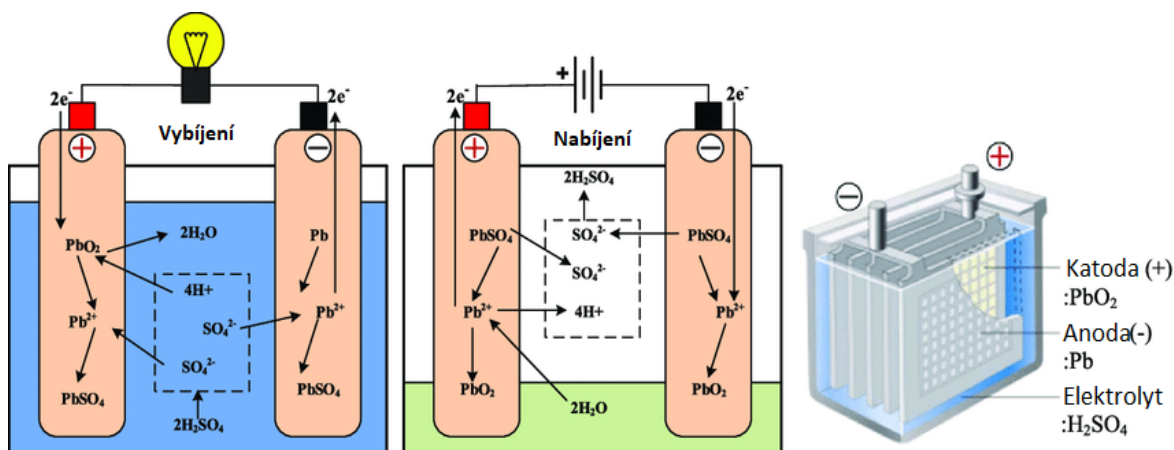
Samovybíjení = 1 %/ den

Životnost = až 800 cyklů

Vnitřní odpor = extrémně nízký

Olovněný akumulátor je jeden z nejstarších akumulátorů vůbec a používá se již několik let. Běžný olovněný akumulátor se skládá ze dvou elektrod, kdy v nabitěm stavu je záporná elektroda tvořena houbovým olovem (Pb) a kladná elektroda oxidem olovičitým (PbO₂). Procesy nabíjení, vybíjení a jednotlivé reakce jsou zobrazeny na obrázku č. 9. Elektrody jsou

ponořené v elektrolytu zředěné kyseliny sírové. Celkový proces reakce je popsán následující rovnicí: [11]



Obrázek 9: Olověný článek [47]

Olověné akumulátory jsou velmi citlivé na přebíjení nebo naopak na hluboké vybíjení. Při dlouhodobém přebíjení vzniká sulfan, což je jedovatý plyn. Naopak při častém hlubokém vybíjení se jim výrazně snižuje kapacita. Ponechání akumulátoru delší dobu (několik dnů) ve vybitém stavu, dochází k sulfataci na záporné elektrodě. Sulfatace snižuje aktivní hmotu na elektrodě a lze ji odstranit desulfatací, což je nabíjení větším proudem pomocí krátkých pulsů. Olověné akumulátory jsou také citlivé na rychlé nabíjení. [11]

Tyto akumulátory mají velký rozsah použití. V největší míře se využívají v automobilech, v různých vozících nebo jako záložní zdroje. Oblibu si získaly především díky schopnosti poskytnout vysoké proudy (start automobilu). Dále mají velmi nízký vnitřní odpor, malé náklady za wathhodinu a vysokou spolehlivost. Naopak nevýhodou je vysoká hmotnost nebo životnost baterie, kterou ovlivňuje spousta jiných okolností (hloubka vybíjení, způsob nabíjení, provozní teploty, ...). Mají také nízkou měrnou energii, a proto nemají své využití u elektromobilů. [11]

U klasického olověného akumulátoru se při rychlém dobíjení nebo vybíjení vytváří plyn, který uniká pryč a dochází ke ztrátě elektrolytu. Proto se do klasické údržbové baterie musí čas od času dolít destilovaná voda. V dnešní době se dostaly na trh bezúdržbové baterie. Dlouhou dobu se bezúdržbové baterie nazývaly zapečetěné, ovšem zcela uzavřená baterie být nemůže. Tyto baterie mají ventily, díky kterým dochází za zvýšeného tlaku k uvolnění plynů. Tento typ akumulátorů se označuje VRLA (valve regulated sealed lead acid). Moderní bezúdržbové baterie VRLA se nemusí dolívat žádnou kapalinou a nepotřebují žádnou větší údržbu, jelikož elektrolyt je nahrazen speciálním gelem nebo je elektrolyt vsáknut ve skelném vláknu, tzv. AGM baterie (absorbent glass mat). Oba typy akumulátorů se mohou používat

v libovolné poloze díky nekapalnému elektrolytu a jsou navrženy tak, aby omezily vznik plynu. AGM baterie jsou schopné dodat vysoké proudy a rychleji se dobíjí. Proto se využívají u vozidel se systémem start-stop nebo u vozidel, kde je více elektrických spotřebičů. [9]

3.2. Akumulátory na bázi niklu

Akumulátory s kladnou elektrodou na bázi niklu byly vyvinuty na konci 19. století. Mezi tento typ baterie patří nikl – kadmium, nikl – metal hydrid a nikl – zinek články. Jednotlivé typy si postupně popíšeme.

3.2.1. Nikl – kadmium akumulátor (Ni-Cd)

Nominální napětí článku = 1,2 V

Měrná energie = 40–65 Wh*kg⁻¹

Měrný výkon = 125 W*kg⁻¹

Hustota energie = 70-90 Wh*l⁻¹

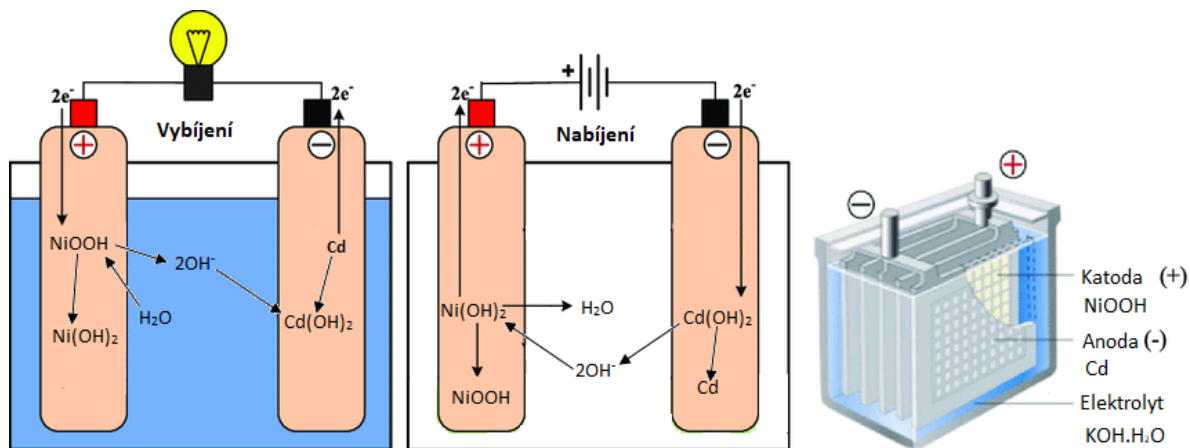
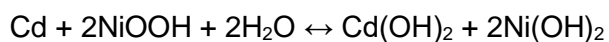
Účinnost = 70-85 %

Samovybitení = 0,5 %/ den

Životnost = až 1200 cyklů

Vnitřní odpor = velmi nízký

Tento typ akumulátoru vznikl jako konkurence pro olověné baterie. Ni-Cd akumulátor má kladnou elektrodu pokrytou z hydroxidu niklu-oxidu a zápornou z kadmia. Jako elektrolyt bývá nejčastěji používán roztok hydroxidu draselného. Chemické reakce jsou popsány na obrázku č. 10. Rovnice popisuje reakce během nabíjení a vybíjení: [11]



Obrázek 10: Nikl-kadmium článek [47]

Ni-Cd akumulátory mají téměř dvakrát větší měrnou energii, než mají olověné baterie. Své uplatnění si našly u bezdrátového elektrického nářadí. Jejich výhodou je uskladňování ve vybitém stavu a také nejsou náchylné na hluboké vybití. Tento akumulátor se dokáže dobít na 60 % během 20 min. Mezi výhody patří také jeho dlouhá životnost a pracovní teplota, v rozsahu od -40 do +80 °C. Nevýhodou tohoto článku je právě použité kadmium. Jedná se o velmi toxický a neekologický prvek, a proto dochází k jeho nahrazování. Jelikož má Ni-Cd článek malé nominální napětí, musí se často skládat do série ve větším počtu, a to způsobí i nárůst ceny. Článek je potřeba nabíjet konstantním proudem. [11]

3.2.2. Nikl – metal hydrid akumulátor (Ni-MH)

Nominální napětí článku = 1,2 V

Měrná energie = 65-80 Wh*kg⁻¹

Měrný výkon = 200 W*kg⁻¹

Hustota energie = 150 Wh*l⁻¹

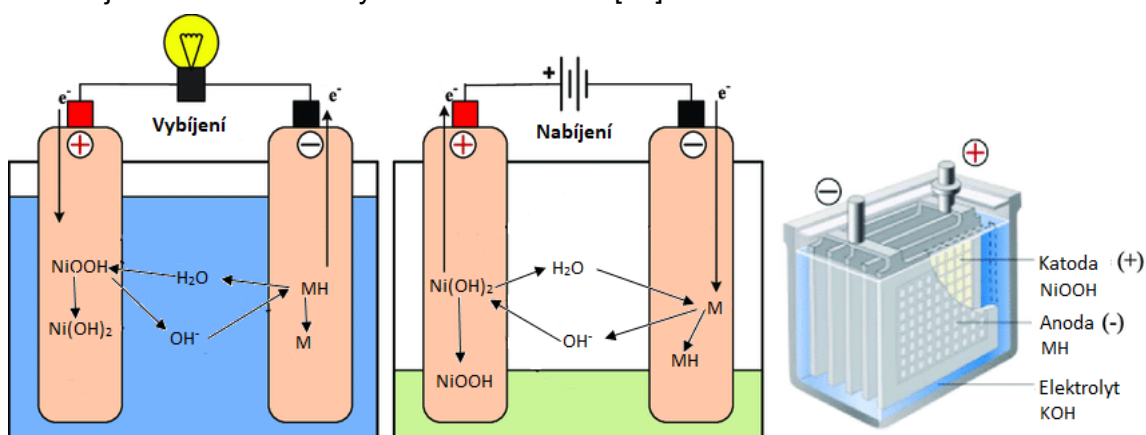
Účinnost = 65 %

Samovybitení = 5 %/ den

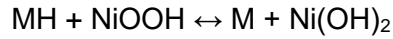
Životnost = až 1000 cyklů

Vnitřní odpor = velmi nízký

Tento typ akumulátorů patří mezi nejnovější, nejrozšířenější. Své uplatnění našel v elektronice např. ve vysílačkách, chůvičkách nebo v mobilních telefonech. Podobně jako u Ni-Cd je elektrolytem hydroxid draselný a kladnou elektrodu tvoří hydroxid nikel-oxidu. Záporná elektroda je tvořena většinou slitinou kovů, jako lanthanu, hliníku, manganu, které absorbují kyslík. Následující chemická reakce popisuje proces nabíjení a vybíjení v Ni-MH článku a reakce jsou také naznačeny na obrázku č. 11. [11]



Obrázek 11: Nikl-metal hydrid článek [47]



Jak je patrné z vlastností akumulátoru, největší nevýhodou je velká míra samovybíjení. Dnešní moderní baterie se snaží tento nedostatek minimalizovat a jsou často označovány jako Ni-MH LSD (low self discharge). Také životnost nepatří k výhodám tohoto typu akumulátoru, což velice ovlivňuje i styl nabíjení a vyšší cenu. Naopak k velkým přednostem patří velká měrná energie, která umožní uložit mnohem více energie do baterie stejné velikosti, jako je Ni-Cd článek. Dále je šetrný k životnímu prostředí a je recyklovatelný. [11]

3.2.3. Nikl – zinek akumulátor (Ni-Zn)

Nominální napětí článku = 1,65 V

Měrná energie = 100 Wh*kg⁻¹

Měrný výkon = 1000 W*kg⁻¹

Hustota energie = 280 Wh*l⁻¹

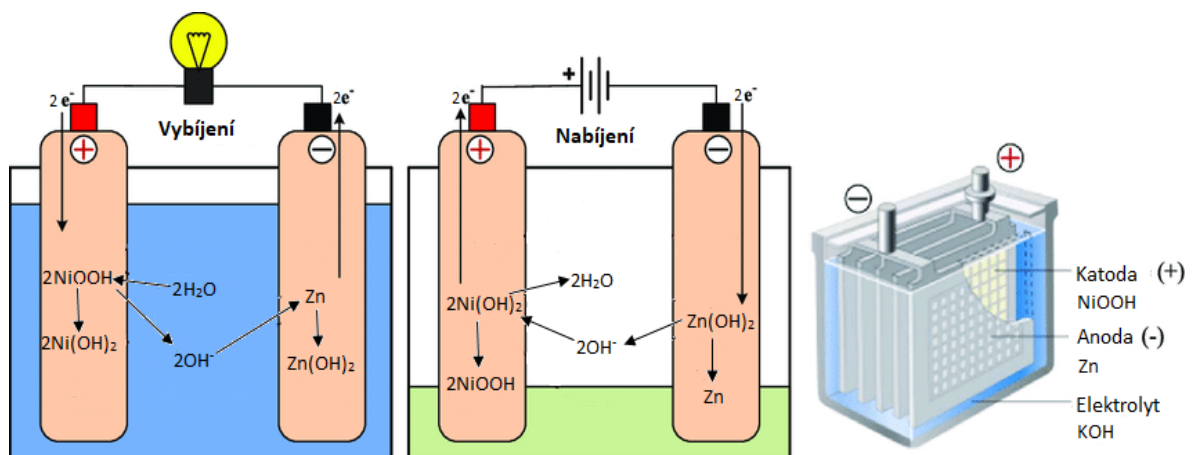
Účinnost = 90 %

Samovybíjení = 0,5 %/ den

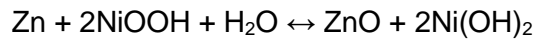
Životnost = 300-800 cyklů

Vnitřní odpor = velmi nízký

Princip Ni-Zn baterie byl objeven před více jak 100 lety T. A. Edisonem. Poté se díky jeho velkým nevýhodám, jako např. životnost, od něho opustilo, ale v dnešní době se opět navrácí na trh. Ni-Zn článek má kladnou elektrodu tvořenou stejně jako u předchozích typů. Záporná elektroda je tvořena zinkem a elektrolytem je voda nebo hydroxid draselný. Elektrochemie je zobrazena na obrázku č. 12. a popsána pomocí rovnice: [11]



Obrázek 12: Nikl-zinek článek [47]



Jak je již uvedené výše, velkým problémem byla zejména životnost baterie, která se pohybovala v rozmezí pár stovek nabití a vybití. Dnes vývoj technologie umožňuje až 800 cyklů. Další výhodou je vyšší jmenovité napětí článku, a tak při skládání článků do série stačí menší počet článků k získání požadovaného napětí. Také jsou velmi ekologické, protože obsahují prvky vyskytující se ve volné přírodě, a tak mohou být plně recyklovatelné. Umožňují poskytovat rovněž vysoké proudy. Nevýhodou je potřeba speciální nabíječky o vyšším napětí. [13]

3.3. Akumulátory na bázi sodíku

Mezi bateriemi jsou na prvním místě lithiové články, které slouží k akumulaci energie. Výkonnostně lze lithium jen stěží překonat, ovšem jeho získání je finančně i energeticky náročné. Od ostatních typů článků se tyto liší provozní teplotou, která je mnohem vyšší, a tak se využívají ve větších systémech, než jsou pouze mobilní telefony nebo notebooky. Další odlišností oproti jiným typům jsou kapalné elektrody. Dále jsou podrobněji popsány dva typy těchto článků. [11]

3.3.1. Sodík-síra akumulátor (NaS)

Nominální napětí článku = 2 V

Měrná energie = 200 Wh*kg⁻¹

Měrný výkon = 200 W*kg⁻¹

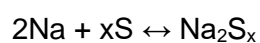
Hustota energie = 200 Wh*l⁻¹

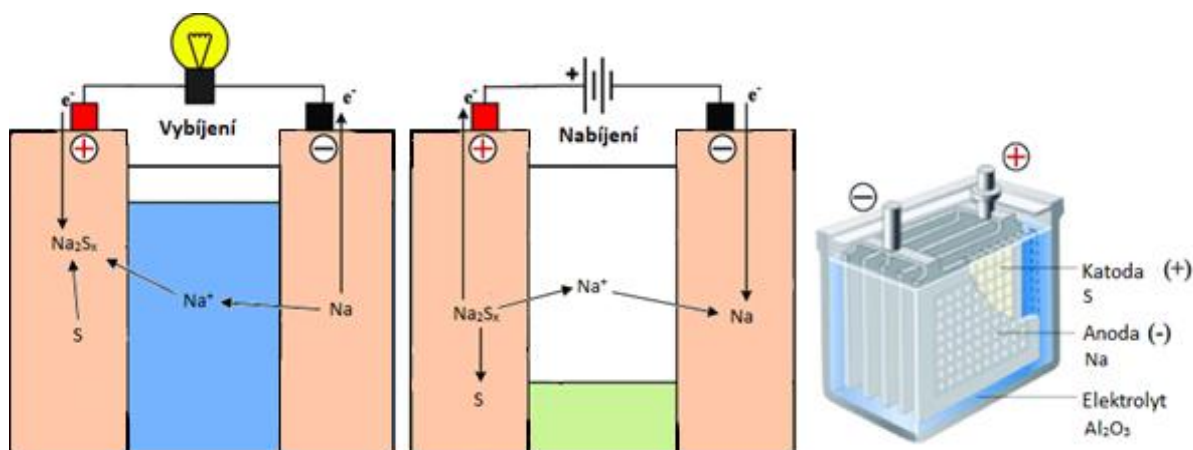
Účinnost = 80-90 %

Životnost = 1000 cyklů

Vnitřní odpor = velmi nízký

Tento typ článků se skládá z nebezpečných látek, které jsou hořlavé, a proto je kladen důraz na konstrukci akumulátoru. Katoda je tvořena tekutým sodíkem a anoda kapalnou sírou. Elektrolyt beta – oxid hlinitý odděluje jednotlivé elektrody od sebe. Jednotlivé reakce jsou popsány chemickou rovnicí a naznačeny v obrázku č. 13. [11]





Obrázek 13: Sodík-síra článěk [47]

Z důvodu vysoké provozní teploty mezi 300-350 °C a použitých reaktivních látek v akumulátoru jsou jednotlivé články uzavřeny ve speciálním obalu. Čistý sodík může začít hořet při kontaktu se vzduchem nebo vodou. Incidentsy, které se staly (např. požár v Japonsku roku 2011, požáry během testování vozidel s tímto typem akumulátorů), zpomalily vývoj těchto článků. Tento typ nabízí velkou hustotu energie (teoreticky až 700 Wh·l⁻¹), a tak se jeho využití nabízí spíše ve velkokapacitních zařízeních, jako podpora obnovitelných elektráren. Vývojem se zabývá Japonská společnost NGK Insulators, která nabízí bateriové moduly pro elektrickou podporu s názvem NAS. [11]

3.3.2. Sodík-nikl-chlorid akumulátor (Na-NiCl₂)

Nominální napětí článku = 2 V (2,5 V plně nabitá)

Měrná energie = 100 Wh·kg⁻¹

Měrný výkon = 150 W·kg⁻¹

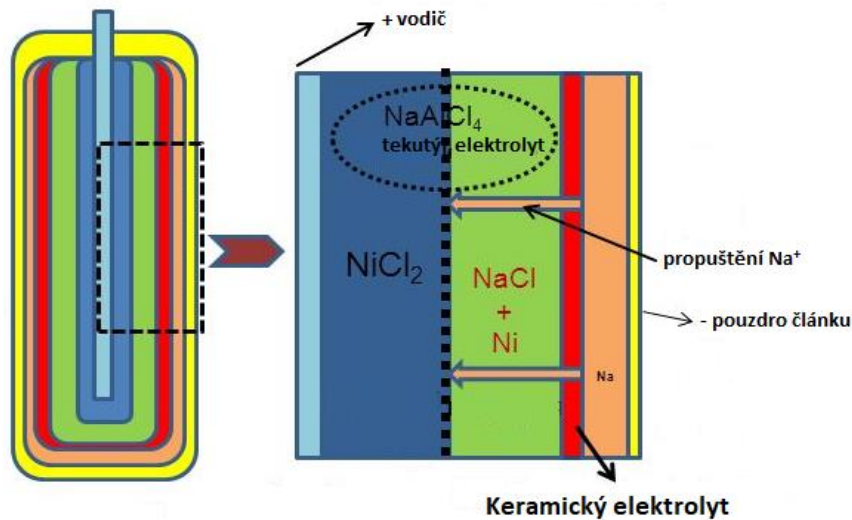
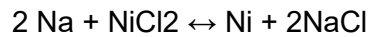
Hustota energie = 150 Wh·l⁻¹

Účinnost = 80-90 %

Životnost = >1000 cyklů

Vnitřní odpor = velmi nízký

Jedná se o velice podobný typ akumulátoru, jako je předchozí sodík-sírový článěk. Katoda je složena z chloridu nikelnatého a anoda z tekutého sodíku. Jsou zde použity dva elektrolyty, keramická stěna odděluje jednotlivé elektrody a druhý elektrolyt tetrachloroaluminát sodný (NaAlCl₄) propouští ionty sodíku na katodu. Průřez článku je zobrazen na obrázku č. 14. Chemická reakce článku je zapsána rovnicí: [11]



Obrázek 14: Sodík-nikl chlorid článěk [48]

Předností těchto článků je dlouhá životnost, což zajišťuje také dvoustěnné pouzdro, ve kterém jsou články umístěny. Výhodou je recyklovatelnost celého článku. Pracovní teplota je o něco nižší než u předchozího typu, ale stále se pohybuje okolo 300 °C. Využití našlo u elektromobilů nebo podobně jako NaS, podpora elektrické sítě. [11]

3.4. Akumulátory na bázi lithia

Tento typ baterií umožnil malý technologický posun mezi sekundárními články a překonávají ve většině parametrů akumulátory na bázi niklu (Ni-MH, Ni-Cd). Výhodou je vyšší energetická hustota a nižší hodnota samovybíjení oproti olověným akumulátorům. Své uplatnění našly u mobilních telefonů, notebooků a také u elektrovozidel. Problémem těchto akumulátorů je samotné lithium. Je velmi reaktivní a při styku se vzduchem může dojít k hoření. Dále není v přírodě hojně rozšířené a jeho těžba je poměrně nákladná. Nejrozšířenější jsou v dnešní době lithium iontové a lithium polymerové akumulátory. Oba typy si dále podrobněji popíšeme. Velkou perspektivou je lithium titanový akumulátor, kterému se budeme také dále věnovat. [11]

3.4.1. Lithium-ion akumulátor (Li-ion)

Nominální napětí článku = 3,6 V

Měrná energie = 140 Wh*kg⁻¹

Měrný výkon = 300-1500 W*kg⁻¹

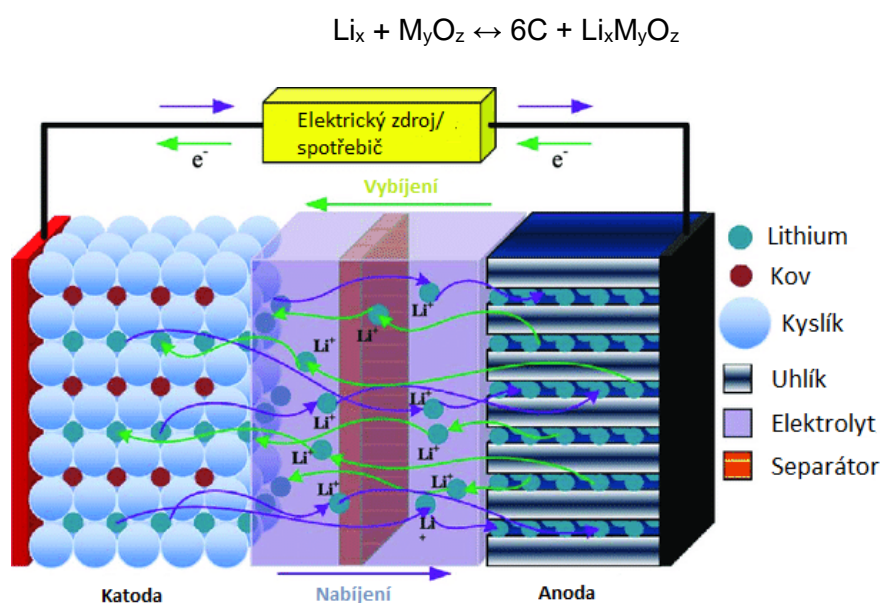
Hustota energie = 250-(teoreticky až 620) Wh*l⁻¹

Samovybíjení = 0,3 %/ den

Životnost = >1000 cyklů

Vnitřní odpor = velmi nízký

Jedná se o nejrozšířenější akumulátor vůbec. Kladná elektroda je tvořena z oxidu kovu, zejména LiCoO_2 , LiFePO_4 , LiMn_2O_4 , anoda je vyrobena z uhlíku nejčastěji grafitu. Elektrolytem jsou zde lithiové soli v organickém rozpouštědle, které umožňují přechod kationtů lithia mezi elektrodami. Všechny typy lithiových článků fungují na stejném principu, kdy z elektrody na elektrodu se přesouvají ionty lithia. U lithiových článků jsou rozdílné pouze látky použité na elektrody nebo elektrolyt. Princip lithiových článků je zobrazen na obrázku č. 15. Chemická reakce je popsána rovnicí: [11]



Obrázek 15: Lithium-ion článek [49]

Největší výhodou je velmi vysoká hustota energie, což umožňuje dělat baterie menší a lehčí oproti jiným typům. Dají se vyrobit v různých tvarech, s dlouhou životností a velkým rozsahem kapacity od desítek mAh až po stovky Ah. Nabíjí se rychleji než ostatní typy. Naopak jsou velmi citlivé na hluboké vybití a prostředí skladování. Recyklovatelnost tohoto typu baterie je velmi obtížná a finančně nákladná. [11]

O velký poprask se postaral zakladatel společnosti Tesla Elon Musk, který postavil v Jižní Austrálii obrovské úložiště energie právě z Li-ion baterií, obrázek č. 16. Systém je energetickou podporou pro nedalekou větrnou elektrárnu a dokáže dodávat energii pro 30 tisíc domácností po dobu jedné hodiny. Li-ion akumulátory využívá i pro své celosvětově známé elektromobily značky Tesla a podílí se na jejich vývoji a posouvá jejich parametry stále dopředu. [14]



Obrázek 16: Lithium-ion akumulátory v Austrálii [50]

3.4.2. Lithium – polymer akumulátor (Li-pol)

Nominální napětí článku = 3,6 V

Měrná energie = 200 Wh*kg⁻¹

Hustota energie = 250-(teoreticky až 730) Wh*l⁻¹

Samovybíjení = 0,1 %/ den

Životnost = 2000 cyklů

Vnitřní odpor = velmi nízký

Li-pol akumulátor vychází z Li-ion článku a vylepšuje některé jeho vlastnosti. Hlavním rozdílem je elektrolyt, který není v tomto případě kapalný, ale je složen z vodivého polymeru. Anodu tvoří lithium nebo sloučenina uhlíku. Oproti Li-ion akumulátoru má menší míru samovybíjení (0,1 % / den), větší energetickou hustotu a vyšší životnost až 2000 cyklů. Li-pol akumulátor je možné rychlonabíjet až čtyřnásobkem kapacity baterie. Nevýhodou je vyšší cena nebo možnost vznícení při mechanickém poškození. Využívá se podobně jako Li-ion akumulátor v mobilních telefonech, notebookách, kamerách, a také v RC modelech nebo dronech. [11]

3.4.3. Lithium-železo-fosfát akumulátor (LiFePO₄ = LFP)

Nominální napětí článku = 3,3 V

Měrná energie = 100 Wh*kg⁻¹

Měrný výkon = 3000 W*kg⁻¹

Hustota energie = 220 Wh*l⁻¹

Životnost = >3000 cyklů

Lithium-železo-fosfát akumulátor je poměrně nedávno vyvinutý článek. Některé parametry jsou hodně podobné jako u předchozích typů. Katoda je v tomto případně tvořena z LiFePO_4 s částicemi uhlíku pro zvýšení vodivosti. Anoda je vyrobena z grafitu a elektrolytem, stejně jako u Li-ion článku, jsou lithiové soli. Velkou předností akumulátoru je životnost, která je samozřejmě závislá na hloubce vybíjení, ale někteří výrobci udávají až 8000 cyklů. Dále nemá na životnost baterie takový vliv okolní teplota, protože LFP článek je mnohem stabilnější. LFP baterie je bezpečnější a při rychlém nabíjení či vybíjení, přehřátí, přebíjení nebo zkratu nedojde k hoření. LFP akumulátory se využívají v elektronice a v zařízeních, kde je požadována bezpečnost a není potřeba vysoká hustota energie, např. elektromobily, zdravotnické zařízení nebo ve vojenských aplikacích. Naopak díky vyšší hmotnosti se nepoužívají v přenosné elektronice jako v noteboocích či mobilních telefonech. [15]

3.4.4. Lithium-titan akumulátor (LTO)

Nominální napětí článku = 2,3 V

Měrná energie = $60 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$

Měrný výkon = $800 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$

Hustota energie = $110 \text{ Wh} \cdot \text{l}^{-1}$

Životnost = až 25 000 cyklů

Vnitřní odpor = extrémně nízký

Opět se jedná o mladší verzi Li-ion baterie. U LTO článku je místo grafitové anody použit oxid titaničitý, jinak je složení článku stejné. Je několik společností, které se tímto typem akumulátoru zabývají: Samsung, Toshiba, švýcarský výrobce baterii Leclanché nebo Altairnano, jež se považuje za průkopníka. Největší předností LTO je nabíjení a vybíjení vysokými proudy, až 10C (desetinásobek kapacity baterie), u ostatních článků se hodnoty pohybují v rozmezí 0,5 – 2C. Tento fakt výrazně snižuje dobu nabíjení. Další výraznou výhodou je téměř čtyřnásobně delší životnost. Také velký rozsah provozních teplot od -30 do 60 °C patří mezi klady LTO, zatímco u jiných typů je to od -10 do 40 °C. Používání baterie mimo teplotní meze vede k výraznému snížení kapacity. I LTO akumulátory mají své stinné stránky, které omezují větší produkci. Nominální napětí je o jeden volt menší oproti Li-ion článku, má menší energetickou hustotu a vyšší pořizovací cenu. Nicméně, když přihlídneme k delší životnosti článku, může se větší počáteční investice vyplatit. Uplatnění by mohly najít v energetice nebo dopravě. V energetice není kladen velký důraz na hmotnost, a proto by zde mohly využívat. U vozidel je hmotnost důležitým parametrem, a tak se nejedná o úplně vhodné

řešení. Proto by řešením mohly být hybridní vozidla místo elektromobilů, kde je baterie menší. V současnosti ho používá mobilní telefony značky Samsung. [16] [17]

3.5. Kov – vzduch akumulátor

Považují se za sekundární články, ale ve skutečnosti jsou to primární články, protože se nedají nabíjet. Články používají kovy, např. zinek, hliník, hořčík nebo lithium, jako zápornou elektrodu. Článek tvoří vodnatý elektrolyt a katodu okolní vzduch. Z katody se přes elektrolyt přivede kyslík na anodu, kde hydroxylové ionty oxidují a vzniká elektrický proud. Tyto články jsou velmi závislé na okolním vzduchu. Patří mezi alternativní řešení pro elektromobily místo Li-ion akumulátorů, jelikož mají podobné vlastnosti, a dokonce vyšší měrnou energii i energetickou hustotu. Je několik typů těchto článků a zde budou podrobněji specifikované dva typy: hliník–vzduch a zinek–vzduch článek. [11]

3.5.1. Hliník – vzduch akumulátor (Al/air)

Nominální napětí článku = 1,2 V

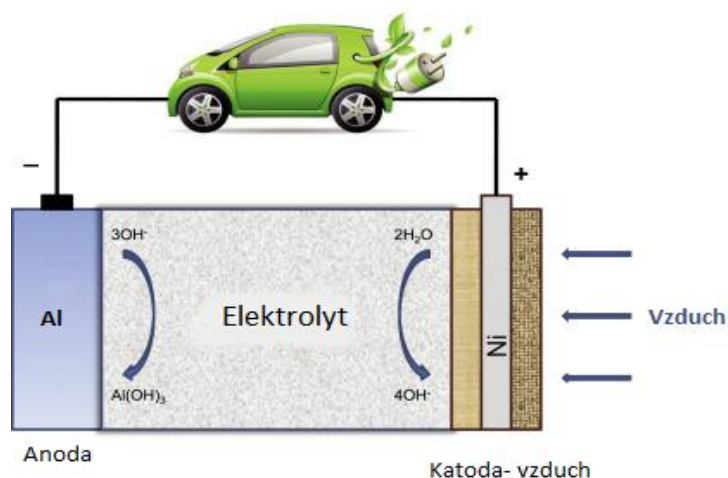
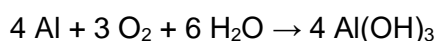
Měrná energie = 1300 Wh*kg⁻¹

Měrný výkon = 200 W*kg⁻¹

Hustota energie = 4 kWh*l⁻¹

Samovybití = minimální

Výhodou tohoto článku je bezpochyby hliník. Ten je hojně rozšířen na Zemi a dá se plně recyklovat. Moderní články používají na katodě mřížku z niklu pro lepší vodivost, viz. obrázek č. 17. Anoda je tvořena z hliníku a elektrochemická reakce je popsána následující rovnicí: [11]



Obrázek 17: Hliník-vzduch článek [51]

Při reakci dochází ke korozi anody, a tak se baterie nedají dobít. Důvodem, proč se řadí mezi sekundární, je recyklace. Použitá baterie se dá celá recyklovat a použít na výrobu nové anody. V dnešní době se vyvíjí systém, který dokáže elektrolyt odsát nebo vyměnit olejem a nedochází tak ke korozi na anodě. Vlastnostmi se hodí pro použití v elektromobilech a mohl by nahradit dosavadní Li-ion akumulátory. Také výroba hliníkové anody není tolik finančně náročná oproti jiným používaným materiálům. Problémem je již zmíněné dobíjení a tuto překážku je potřeba vyřešit. Nyní lze Al/air baterie nalézt ve vojenském prostředí. [11]

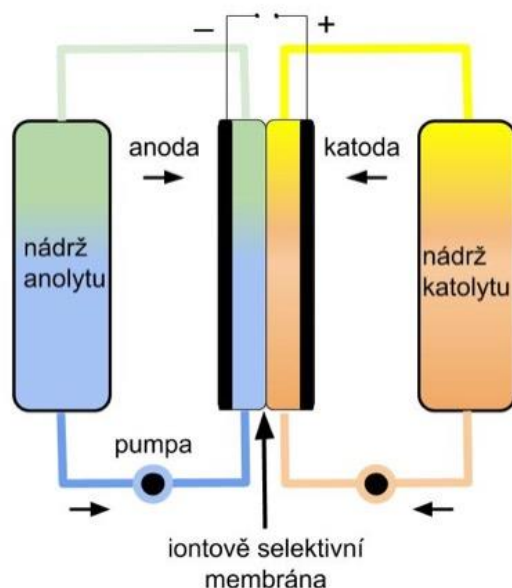
3.5.2. Lithium – vzduch akumulátor (Li-vzduch)

Nejedná se zatím o sériově vyráběný typ baterie, ale nachází se teprve ve stádiu výzkumu v laboratorních podmínkách. Princip fungování je totožný s Al-vzduch článkem, až na anodu, zde tvořenou lithiem. Důvodem, proč se zde o nich píše, jsou její velmi slibné vlastnosti vhodné pro elektromobilitu. Energetická hustota Li-vzduch článku se pohybuje okolo $11 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$, což se velice přibližuje k energetické hustotě benzínu (energetická hustota benzínu je přibližně $13 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$). To by znamenalo, že by se hmotnost elektromobilu oproti vozidlu se spalovacím motorem příliš nenavýšila a zároveň by baterie nezabírala tolik prostoru ve vozidle jako nyní Li-ion akumulátory. K uvedení výroby Li-vzduch akumulátoru je zapotřebí vyřešit několik otázek. Jednou z nich je odfiltrování čistého kyslíku od ostatních složek a přívod kyslíku do akumulátoru nebo zamezení vzniku látek, které snižují vlastnosti akumulátoru. [18]

3.6. Redoxní průtokové akumulátory

Poslední způsob umožňující akumulaci energie jsou redoxní průtokové akumulátory. Jedná se o elektrochemické zařízení podobné, jako předchozí typy, akorát neukládají energii na elektrodách, ale v elektrolytu. Typická průtoková baterie se skládá ze dvou elektrod a elektrolytu, který je rozdělen do dvou vnějších nádrží. Z jednotlivých nádrží se elektrolyt (kladně nebo záporně nabitý) čerpá do dané části článku (kladný elektrolyt na katodu, záporný elektrolyt na anodu) rozdělené ion selektivní membránou, viz. obrázek č. 18. Jako elektrolyt se používá několik typů látek, např. zinek-brom, vanad-vanad, zinek-železo. Obrovskou výhodou je životnost, která se pohybuje okolo desítek tisíc cyklů. Celková kapacita uchované energie je závislá na množství elektrolytu v nádržích, zatímco výstupní výkon závisí na ploše elektrod. Proto se tento typ baterii hodí pro velkoobjemové ukládání energie na dlouhou dobu. Jsou velmi šetrné k životnímu prostředí, mají vysokou účinnost a dokáží přejít téměř okamžitě

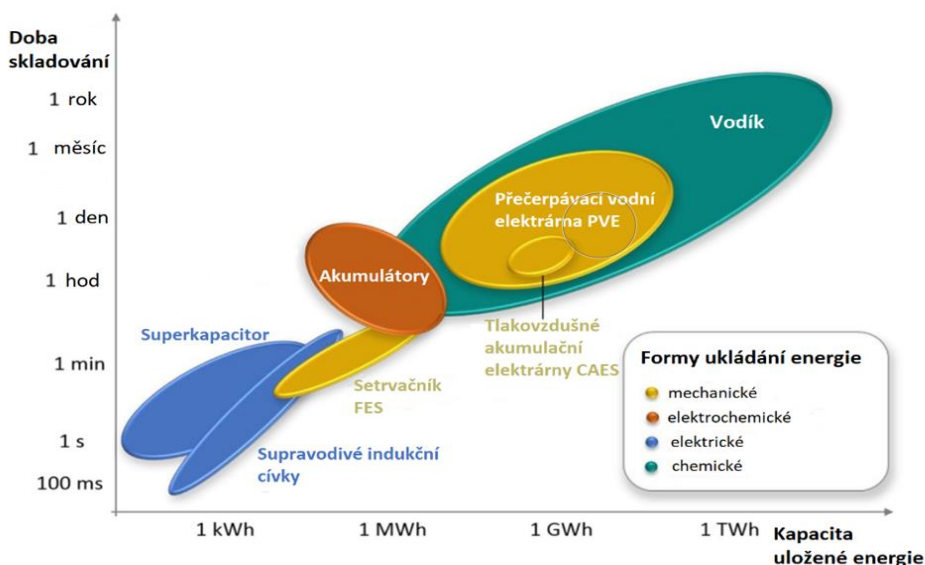
z režimu nabíjení do vybíjení. Nevýhodou je velmi nízká energetická hustota, skladování a čerpání elektrolytu do článku. [19]



Obrázek 18: Redoxní průtokový článek [52]

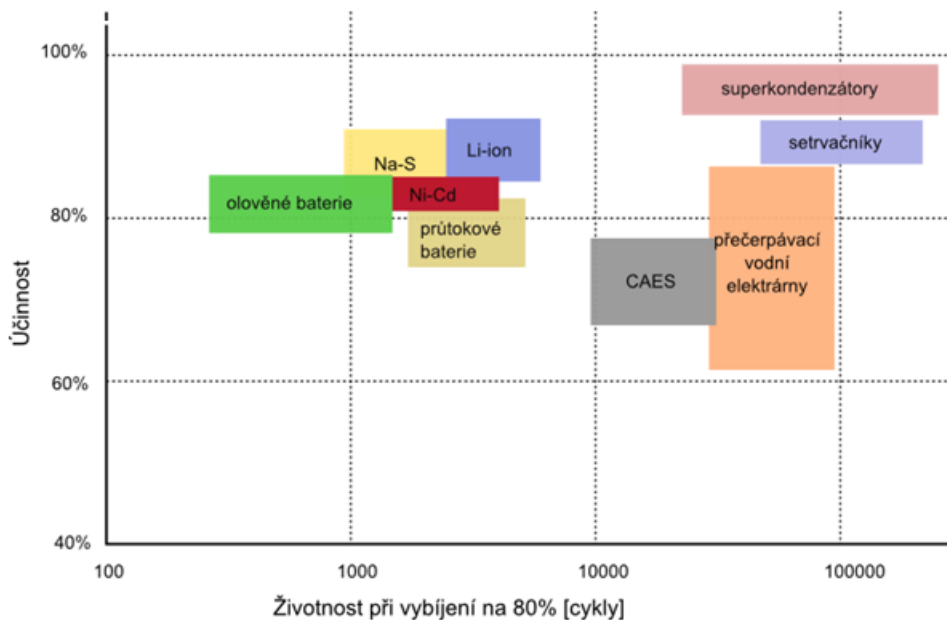
3.7. Srovnání jednotlivých typů ukládání energie

Každý ze zmíněných systémů sloužící k akumulaci energie má svoje výhody a nevýhody a dají se využívat pro různé účely. Následující grafy porovnávají jednotlivé technologie podle daných parametrů. Na obrázku č. 19 jsou různé způsoby skladování energie zobrazené na základě množství uložené energie. Velké množství energie se dá uskladnit do vodíku, PVE a CAES na dlouhou dobu. Z toho vyplývá, že se tento způsob skladování energie hodí pro pokrytí nejvyšší poptávky po elektrické energii. Jedná se spíše o velkoobjemové systémy.



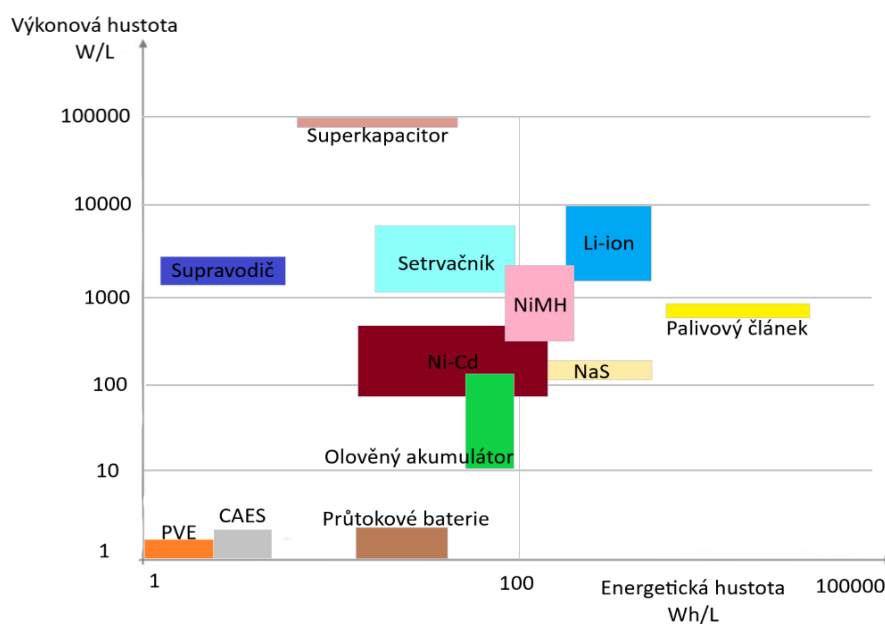
Obrázek 19: Způsoby ukládání energie podle kapacity a doby skladování [20]

Pokud potřebujeme zařízení s dlouhou životností a téměř okamžitou dodávkou proudu, jsou superkapacitory (superkondenzátory) nebo setrvačnický tím pravým řešením. To nám potvrzuje i obrázek č. 20. Využívají se jako záložní zdroje při krátkodobých výpadcích a své uplatnění si našly i v automobilovém průmyslu. [20]



Obrázek 20: Způsoby ukládání energie podle účinnosti a životnosti [21]

Následující srovnání je velmi důležité zejména pro systémy, kde hraje velkou roli hmotnost a objem. Obrázek č. 21 zobrazuje jednotlivé technologie na základě energetické hustoty. Zařízení nakreslené v pravém horním rohu grafu potřebují pro uchování dané energie mnohem méně prostoru než zařízení uvedené v levém spodním rohu grafu. Proto se Li-ion akumulátory využívají v mobilních telefonech, notebookech nebo v elektromobilech. [21]



Obrázek 21: Způsoby ukládání energie podle energetické a výkonové hustoty [21]

3.8. Používané akumulátory ve vozidlech

Autobaterie je dnes nedílnou součástí každého vozidla. Následující tabulka č.2 porovnává nejběžnější používané akumulátory ve vozidlech. V dnešní době najdeme s největší pravděpodobností ve vozidle se spalovacím motorem olověný akumulátor. Klasický konvenční automobil má tzv. SLI (Starting, lighting, ignition) baterii. Jak z názvu vyplývá, jedná se o baterii, která poskytne vysoký krátkodobý proud pro nastartování vozidla a poté se opět dobije. Jsou levné, spolehlivé, bezúdržbové, ale pro jiné účely nepoužitelné. Podle využití můžeme olověné akumulátory dělit na již zmíněné SLI, trakční nebo stacionární (záložní zdroje). V drtivé většině se využívá VRLA baterie, kterých je více druhů. Liší se množstvím aktivního materiálu na elektrodách a použitým elektrolytem ve formě gelu, nebo je elektrolyt nasáklý v tkanině ze skelných vláken (AGM). Nevadí jim časté hluboké vybíjení a jsou bezúdržbové. Samozřejmě, že existují výjimky a u sportovních vozidel s výkonnějšími motory se můžeme setkat i s Li-ion baterií. Li-ion akumulátory našly své uplatnění především u hybridních a elektrických vozidel. Svoji roli si získaly díky vysoké energetické hustotě a životnosti. Pro akumulaci energie se využívají napříč všemi automobilkami, od koncernu VW přes Korejský Hyundai až po Teslu. Jako každé zařízení má i Li-ion akumulátor své nevýhody, zejména v použitých materiálech, a tak se automobilky snažily najít alternativní řešení. Velký průkopník elektrovozidel značky Toyota použil do svých vozidel Ni-MH baterie. Nabízí sice podobné parametry jako Li-ion baterie, ale hlavně velká hodnota samovybíjení a nestabilita při kolísání teplot, vedly spíše k využití u hybridních vozidel např. Cadillac Escalade dual hybrid, Lexus CT nebo Ford Fusion Hybrid. Byly i jiné pokusy o zabudování různých typů akumulátorů do vozidel, nicméně je to právě Li-ion článek, který vládne elektromobilitě. Současné podmínky se snaží elektromobilitu posunout kupředu. Co brzdí rychlejšímu rozvoji elektromobilů je infrastruktura nabíjecích stanic, výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů, a právě akumulace energie. Proto se budou dále vyvíjet nové technologie, které se budou snažit nahradit nebo posunout parametry těch současných. [22]

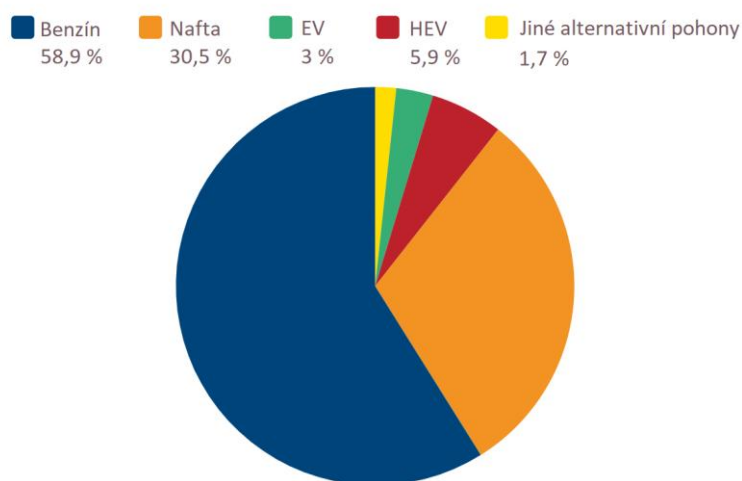
Tabulka 2: Srovnání článků [11]

	Olověný	NaS	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	LTO
Měrná energie [Wh*kg ⁻¹]	35-50	150-240	50-60	70-95	80-130	70
Měrný výkon [V*kg ⁻¹]	150-400	230	80-150	200-300	300	800
Nominální napětí [V]	2	2	1,2	1,2	3,6	2,3
Samovybíjení [%/ měsíc]	12	Min.	15	35	10	5
Životnost [cykly]	500	1000	800	750- 1200	>1000	>10000
Účinnost [%]	80	80	75	70	95	90
Cena [US\$/kWh]	120-150	250-450	350-350	200-350	200	/

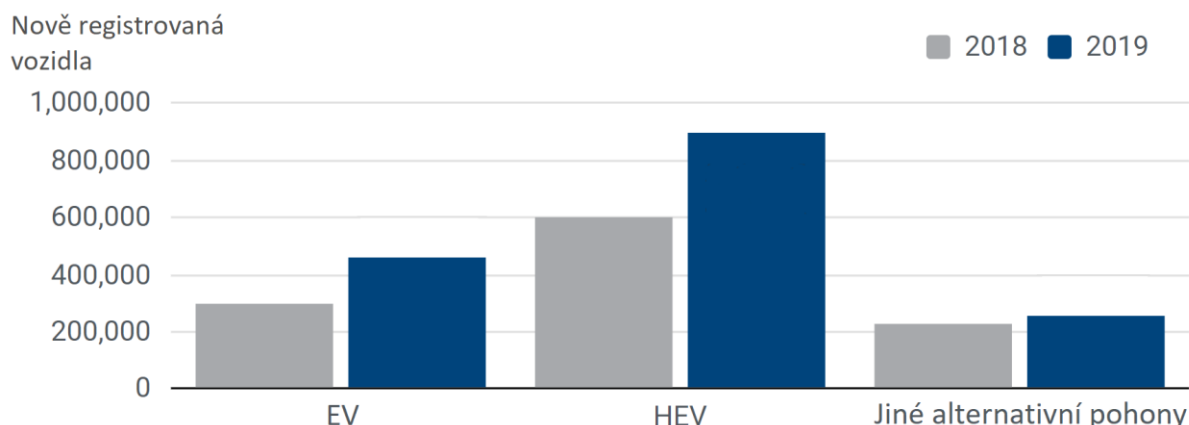
4. Hnací soustava vozidel

Jednou z nejdůležitějších částí, bez které se žádné vozidlo neobejde, je hnací soustava. Hlavními částmi hnací soustavy jsou motor, spojka a převodovka. Pro tuto práci nás bude zajímat zejména zařízení přeměňující jiný druh energie na mechanickou energii, tzn. energii pohánějící vozidlo. Budeme se tedy zabývat zejména motory. V dnešní době je většina vozidel poháněna motory s vnitřním spalováním. Jedná se o zážehové motory spalující benzín nebo vznětové motory spalující naftu. V EU je téměř 90 % nově registrovaných vozidel tvořeno právě jedním z těchto typů motorů, což potvrzuje i srovnání EU z roku 2019 na obrázku č. 22. [23]

Nicméně jejich počty klesají a snaží se je nahradit nové alternativní pohony. Důvodem jsou škodlivé látky oxidu uhlíku, oxidu dusíku a prachové částice (u vznětových motorů), vznikající při spalování benzínu či nafty, které mají neblahý vliv na životní prostředí. Proto jsou spalovací motory považovány za neekologické, a to je důvod rozvoje elektromobilů jako alternativního pohonu. Z následujícího grafu na obrázku č. 23 je patrné, že elektromobily a zejména hybridní vozidla, a to i přes různé překážky, získávají na oblibě a roste počet těchto automobilů v EU, především v Nizozemsku a Norsku. Hnacím agregátem elektromobilů i hybridních vozidel je elektromotor. V další části práce budou popsány nejčastější typy elektromotorů využívané právě u této skupiny vozidel. [23]

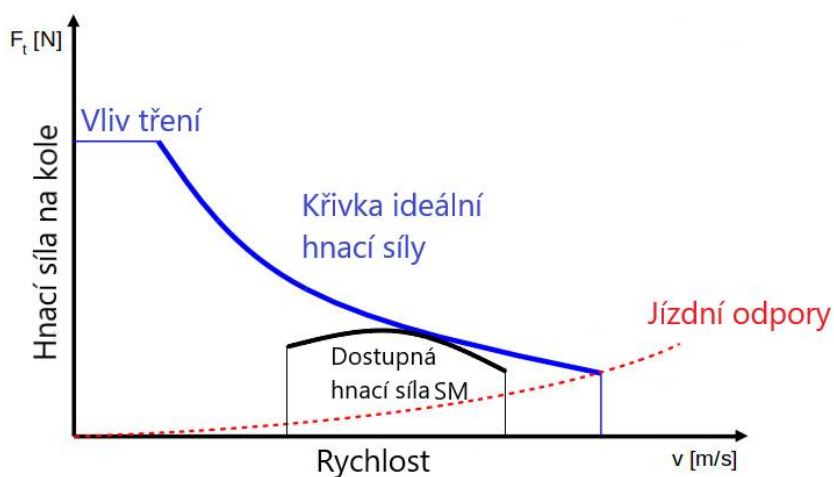


Obrázek 22: Nově registrovaná vozidla v EU v roce 2019 podle typu pohonu [23]



Obrázek 24: Nově registrovaná hybridní a elektrická vozidla v EU v roce 2019 [23]

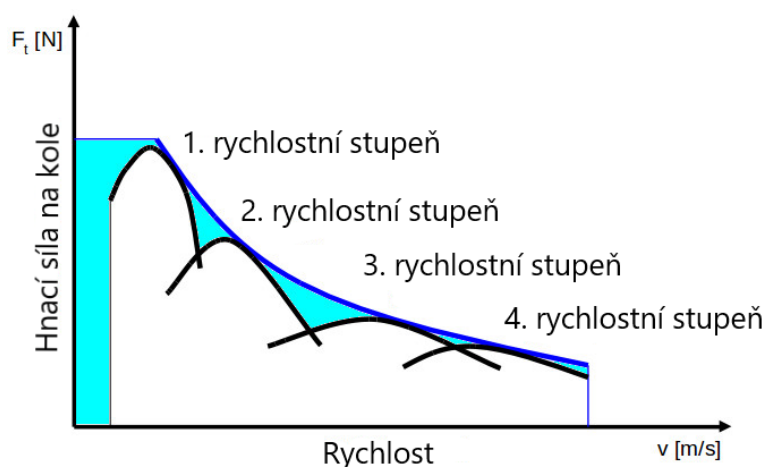
Ve stručnosti si popíšeme základní rozdíl mezi spalovacím motorem (SM) a elektromotorem. K tomu, abychom se mohli s vozidlem rozjet, potřebujeme velkou hnací sílu (točivý moment) k překonání všech statických odporů. Následující graf na obrázku č. 24 ukazuje na ideální tažnou sílu, která je potřebná při rozjezdu vozidla na určitou rychlost. Při vysokých rychlostech mají velký vliv jízdní odpory, zejména odpor aerodynamický, který roste s druhým kvadrátem rychlosti. Také je v grafu zaznačená charakteristika točivého momentu spalovacího motoru. Jak je z obrázku patrné, samotný SM nestačí pro rozjezd vozidla, a proto je potřeba převodová skříň, díky ní jsme schopni se s vozidlem rozjet. [23]



Obrázek 23: Ideální křivka trakční síly pro rozjezd vozidla a hnací síla SM [24]

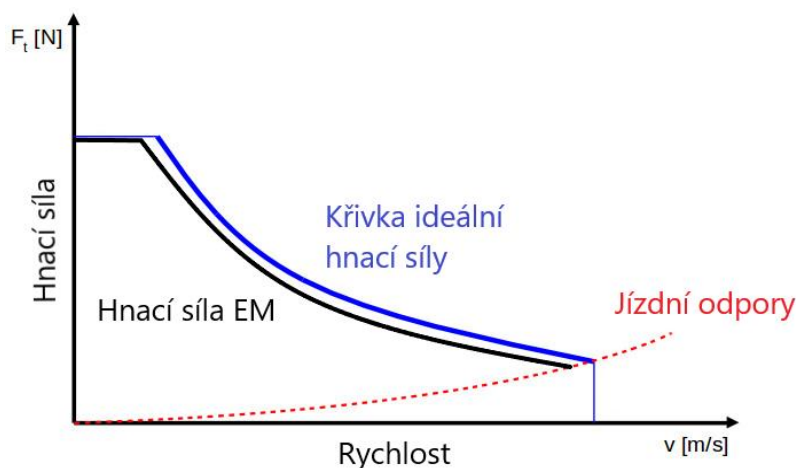
Jednotlivé rychlostní stupně mají za úkol upravit tažnou sílu tak, aby bylo vozidlo schopné akcelarovat. Na obrázku č. 25 jsou zobrazeny jednotlivé rychlostní stupně, které kopírují ideální křivku hnací síly. Jedná se o čtyřstupňovou převodovku. Ve chvíli, kdy se budeme bavit o účinnosti, tak každá komponenta hnací soustavy snižuje celkovou účinnost. Jelikož SM se bez převodovky neobejde, dochází i v ní ke snížení, už tak poměrně malé, účinnosti hnací

soustavy se SM (účinnost samotného SM se pohybuje v rozmezí 30-40 %). Náhradou SM by mohl být elektromotor, který má mnohem efektivnější charakteristiku motoru pro vozidlo. [24]



Obrázek 25: Ideální trakční síla pro rozjezd a dostupná trakční síla rychlostních stupňů [24]

Elektromotor (EM) je zařízení přeměňující elektrickou energii na mechanickou. Nicméně může pracovat i naopak, tedy měnit mechanickou energii na elektrickou a takové zařízení se nazývá generátor. V dnešní době se využívají téměř všude, v domácnostech, v průmyslu nebo dopravě. Zároveň je několik typů elektromotorů, ale pro naše účely si dále rozebereme elektromotory používané právě v dopravě. Jak je již zmíněno výše, hlavní výhodou elektromotoru oproti spalovacímu motoru je nejenom jeho charakteristika tažné síly, ale i vyšší účinnost, pohybující se okolo 85 %. Je mnohem lehčí, menší a také finančně méně nákladný. Elektromobily nepotřebují ke své akceleraci žádnou vícešupňovou převodovku jako SM. Elektromotor má charakteristiku tažné síly velice podobnou potřebné charakteristice rozjezdu vozidla. O tomto faktu se můžeme přesvědčit na obrázku č. 26. Proto elektromobily často nemají vícešupňovou převodovku a většinou jsou vybaveny pouze jednostupňovým redukčním převodem, který má pozitivní vliv na maximální točivý moment při rozjezdu. [25]

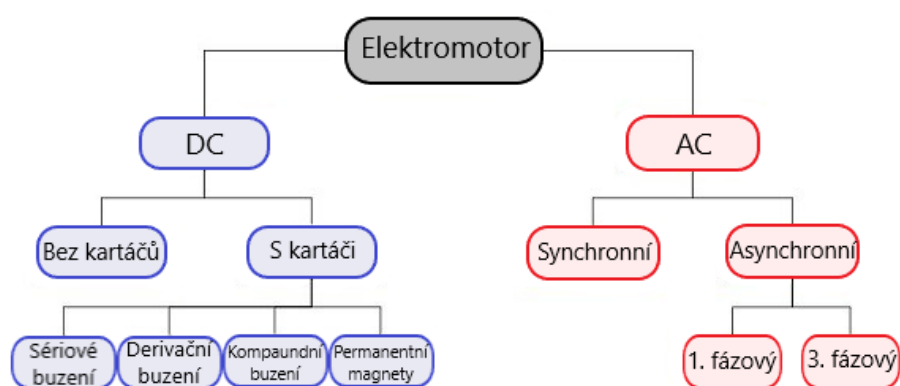


Obrázek 26: Ideální trakční síla pro rozjezd a dostupná trakční síla elektromotoru [25]

Díky momentové charakteristice a otáčkovému rozsahu pak už další převodové stupně nejsou potřeba. Nyní si popíšeme některé typy elektromotorů využívaných v elektromobilitě. [25]

4.1. Elektromotor

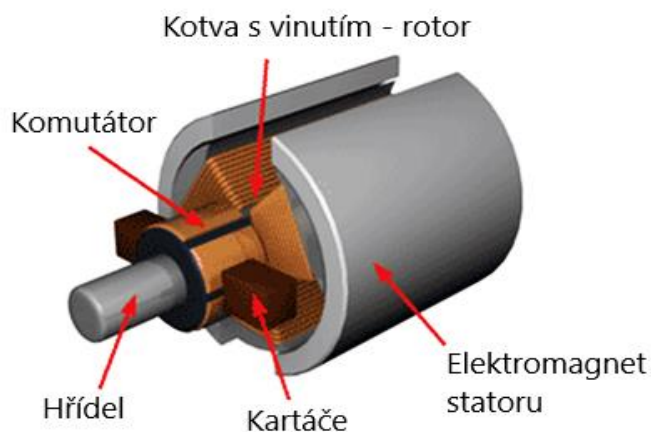
Dnešní doba nabízí nespočet různých elektromotorů. Přesto všechny fungují na podobném principu, a to na silovém působení magnetického pole. Elektromotory můžeme rozdělit do skupin podle různých vlastností, ovšem nejběžnější dělení je podle napájení elektromotoru, na střídavé (AC) a stejnosměrné (DC), viz. obrázek č. 27. Každý elektromotor má dvě základní části, pohyblivou nebo-li rotor a statickou část nazývanou stator. Nyní si popíšeme vybrané čtyři elektromotory. [25]



Obrázek 27: Rozdělení elektromotorů [26]

4.1.1. Sériový DC motor

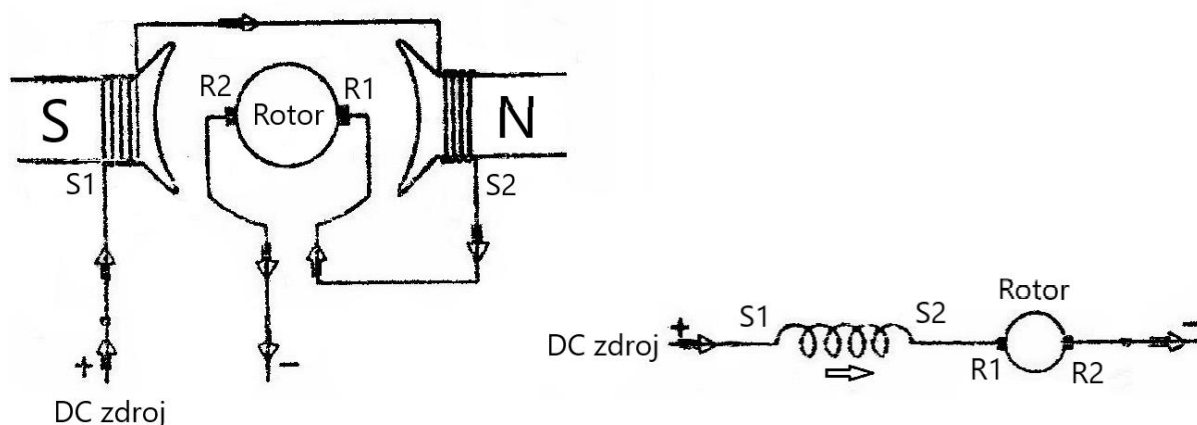
Jedná se o nezákladnější elektromotor používaný více jak 100 let. Využíval se zejména jako trakční pohon pro elektrické lokomotivy, trolejbusy, metro nebo elektromobily. [27]



Obrázek 28: Sériový DC motor [27]

Skládá se z rotoru, statoru, komutátoru, hřídele, vinutí a kartáče. Stator je tvořen dvěma nebo více elektromagnety. Rotor tvoří kotva s vinutím spojená s komutátorem a středem rotoru je vedena hřídel přenášející točivý moment. Na komutátor je přiváděn elektrický proud pomocí kartáčků. Schéma DC elektromotoru je zobrazeno na obrázku č. 28. [27]

Elektromagnet ve statoru vytváří magnetické pole, které působí na kotvu (elektromagnet) rotoru. Opačné póly se přitahují a stejné odpuzují (podobně jako dva magnety se opačnými póly přitahují a stejnými se odpuzují). Stator je nehybný, a tak se rotor snaží vždy otočit tak, aby byl přitahován k elektromagnetu statoru. Aby se rotor otáčel stále v jednom směru, je nutné přepólování kotvy pomocí komutátoru. Komutátor je soustava několika elektrických vodičů od sebe vzájemně oddělených. Síla pohybující kotvou rotoru je vyjádřena Lorentzovým vztahem $F=BIL \cos\alpha$, kde B je magnetická indukce, I je velikost proudu ve vinutí kotvy, L je délka vinutí a $\cos\alpha$ je úhel vinutí kotvy a indukčních čar vzniklých elektromagnetem statoru. Rozdíl mezi sériovými a ostatními typy elektromotorů je v zapojení elektromagnetů statoru a kotvy rotoru. Schéma sériového zapojení je na obrázku č. 29. [28]

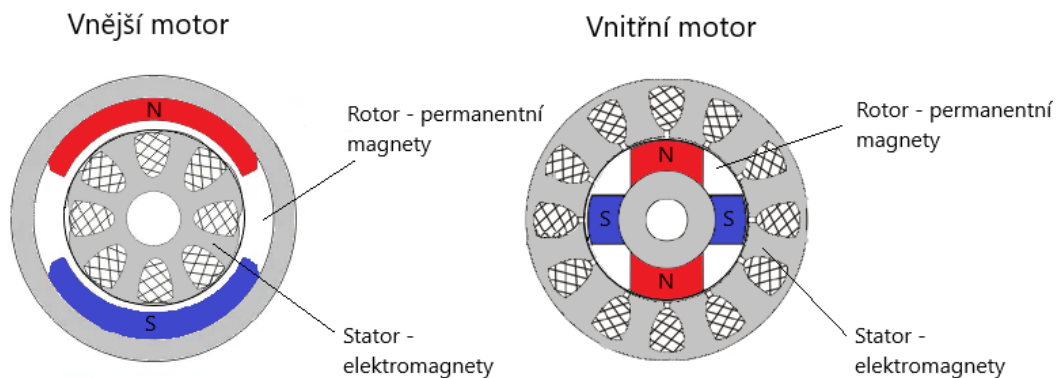


Obrázek 29: Zapojení sériového motoru [53]

Tento typ elektromotoru poskytuje vysoký startovací točivý moment. Při zatížení elektromotoru, tedy poklesu otáček, dojde ke zvýšení točivého momentu. Jelikož se jedná o sériové zapojení, tak zvýšení proudu v kotvě vede ke zvýšení buzení ve statoru. Je potřeba u tohoto typu motoru řídit otáčky, neboť při nezatížení mohou být příliš vysoké, což by mohlo vést k poškození motoru. To je také důvod, proč se využívá spíše jako trakční motor, kde je zatížen permanentně. Mezi jeho výhody patří nenáročná konstrukce a nižší cena. Naopak je náročný na údržbu, protože mezi kartáči a komutátorem dochází k obušování materiálu. Dále je nevýhodou samotná charakteristika motoru, konkrétně vztah mezi otáčky a točivým momentem. [28]

4.1.2. DC bezkartáčový motor (BLDC)

DC bezkartáčový motor (Brushless DC motors) se řadí mezi modernější DC elektromotory, navržen v polovině 20. stol. Jak název napovídá, jedná se o typ motoru bez kartáčů. Na rozdíl od motoru popsaného výše, tento nemá kartáče ani komutátor. Stator je složen z vinutí neboli elektromagnetů a rotor nejčastěji představuje permanentní magnet. Dále je zde elektronická jednotka, která pomocí Hallové sondy určí polohu rotoru a následně napájí příslušné vinutí statoru, které vytvoří magnetické pole. Většinou se jedná o třífázový stator, kde jsou vedeny do elektromagnetů ve statoru tři oddělené stejnoměrné fáze. Elektrický komutátor postupně pouští do jednotlivých vinutí proud, magnetické pole statoru se začne otáčet a s ním i rotor. Podobně jako u ostatních, i tento využívá elektromagnetické zákony – opačné póly magnetu se přitahují a stejné odpuzují. Rotor se otáčí stejnou rychlostí, jakou je postupně pouštěn proud do vinutí statoru, a proto se jedná o synchronní motor. BLDC motor se vyrábí ve dvou verzích. Buď s vnitřním rotorem, nebo s vnějším. U vnitřního je rotor uvnitř statoru, tudíž jsou permanentní magnety rotoru obklopeny elektromagnety statoru. U vnějšího typu je to přesně opačně, permanentní magnety jsou umístěny okolo elektromagnetů statoru. Oba dva typy jsou znázorněny na obrázku č. 30. Vnější typ motoru se často používá u skútrů, kdy je motor přímo implementován do kola nebo u stropních ventilátorů. [29]



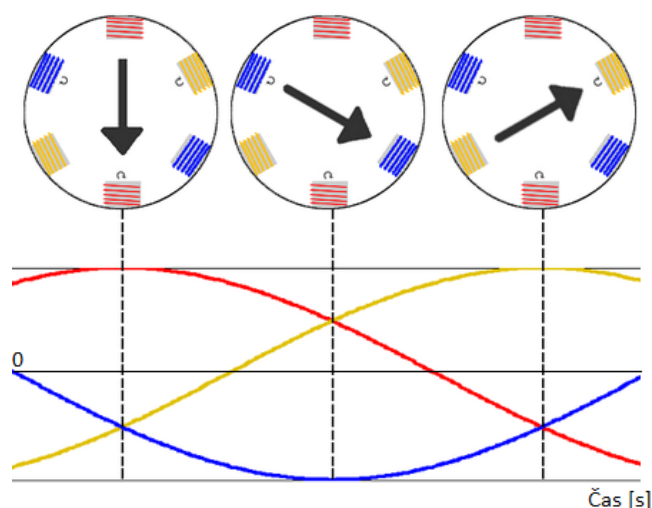
Obrázek 30: Bezkartáčový DC motor [54]

U kartáčových motorů dochází k tření mezi kartáčem a komutátorem, což snižuje výkon i účinnost motoru a u méně výkonných motorů to mohou být výrazné ztráty. Díky absenci kartáčů a komutátoru dosahují BLDC motory účinnosti až kolem 95 % a nejsou ani tolik náročné na údržbu, zejména pak na výměnu kartáčů. K dalším výhodám patří spolehlivost, poskytnutí vysokého výkonu a oproti jiným typům jsou méně hlučné. Elektronicky řízený komutátor umožňuje lépe řídit otáčky motoru, nicméně jsou k tomu potřeba sondy na měření

polohy rotoru. Největší nevýhodou je vyšší pořizovací cena, která ovšem při menší údržbě a delší životnosti může být později vrácena. [29]

4.1.3. AC synchronní motor s permanentními magnety (PMSM)

PMSM (permanent magnet synchronous motor) je konstrukcí velice podobný předchozímu typu motoru BLDC. Stator je tvořený také z vinutí, nejčastěji třífázové. Rotor je složen podobně jako u BLDC motorů z permanentních magnetů. Základní rozdíl je v napájení, které je u tohoto typu střídavé. Stator pomocí AC zdroje vytváří otáčející magnetické pole a rotor vytváří konstantní magnetické pole. Ve chvíli, kdy se motor připojí ke zdroji, magnetické pole statoru se začne otáčet a rotor se začne natáčet důsledkem otáčejícího magnetického pole statoru. Rotor se otáčí stejnou rychlostí, jako se otáčí magnetické pole statoru, tzn. synchronní rychlostí. U třífázového motoru jsou jednotlivé fáze (sinusoidy) vůči sobě posunuté a jednotlivé elektromagnety jsou napojeny na danou fázi. Princip AC motoru je naznačen na obrázku č. 31. Jednotlivé barvy představují jednotlivé fáze a šipka naznačuje pohyb rotoru. [30]

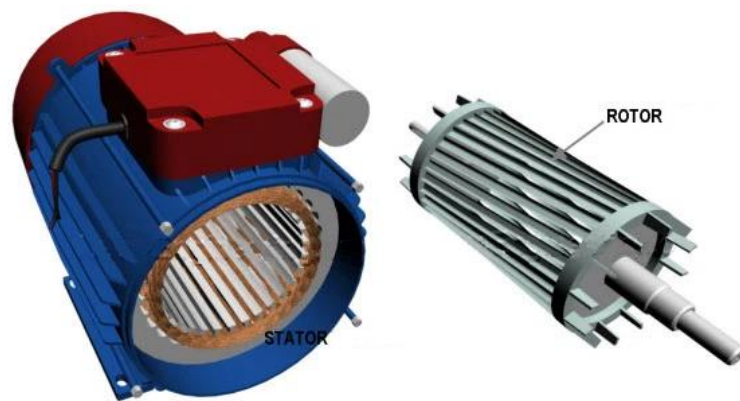


Obrázek 31: Průběh fází v synchronním AC motoru [55]

Rychlost otáčení rotoru se dá řídit nastavením frekvence napětí (v běžné síti je frekvence 50 Hz). Nicméně synchronní motory nedokáží startovat bez zvláštního zařízení. Musí dojít buď ke snížení frekvence a postupnému zvyšování a nebo musí mít navíc pomocný rozběhový motor. Další nevýhodou je také vyšší cena, zejména díky permanentním magnetům z drahých materiálů. Výhody jsou podobné jako u BLDC motoru, tzn. velká účinnost, výkonová hustota a řízení rychlosti otáček. V současnosti se tento typ motoru hojně používá v elektromobilitě, napříč všem automobilkami nebo u zařízení s velkým výkonem. [30]

4.1.4. Asynchronní třífázový motor (indukční motor)

Indukční motor patří k nejpoužívanějšímu elektrickému motoru vůbec. Zejména jednoduchost, spolehlivost a nulová údržba umožnily používat tento typ motoru v různých odvětvích. Konstrukce tohoto typu se mírně liší od ostatních elektromotorů. Stator je tvořen několika tenkými izolovanými plechy, ve kterých je izolovaně umístěno vinutí. Rotor se skládá z několika plechů na konci spojených, v nichž je vloženo vinutí. Rotor připomíná klec, a proto je někdy označován jako klecový rotor. Dále je v motoru hřídel a ložiska. Schéma statoru a rotoru asynchronního motoru je na obrázku č. 32. [31]



Obrázek 32: Asynchronní třífázový motor [56]

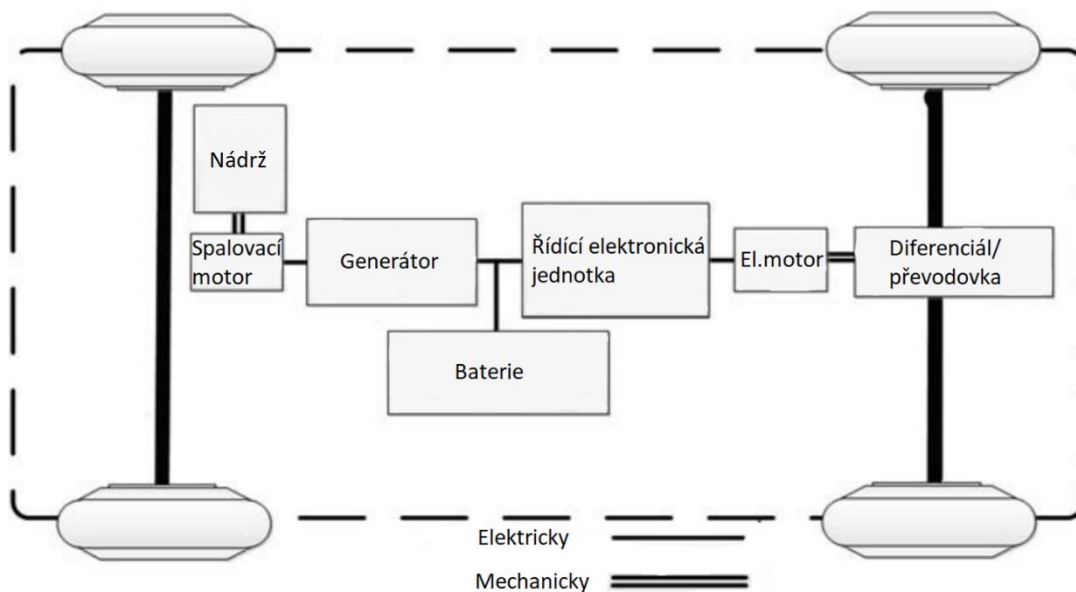
Princip statoru je podobný jako u předchozího asynchronního stroje. Pomocí AC třífázového napájení se vytváří točivé magnetické pole. To indukuje v rotoru napětí, začne rotorem protékat proud a společně s točivým magnetickým polem začne na rotor působit síla. Důležitým pojmem u asynchronních motorů je skluz. Točivé magnetické pole statoru a rotoru se vůči sobě otáčí různou rychlostí (asynchronně). Rozdíl rychlostí se nazývá právě skluz a je udáván v procentech. U menších motorů bývá větší, ale obecně se pohybuje okolo 5-10 %. Záporný skluz znamená, že rotor se otáčí větší rychlostí než točivé magnetické pole statoru. Motor začne pracovat jako generátor. Rychlost otáčení lze řídit pomocí frekvenčního měniče a nepotřebuje žádné pomocné zařízení ke startování. Tento motor je ze všech typů finančně nejméně nákladný. Nevýhodou je menší startovací točivý moment a potřeba třífázového zdroje. Využívá ho automobilka Tesla ve svých modelech. [31]

5. Hybridní vozidlo (HEV)

Hybridní vozidlo bychom mohli nazvat jako pomyslný střed mezi konvenčními vozidly a elektromobily. Jedná se o mezistupeň přechodu na elektromobilitu. Rychlejšímu vývoji elektrických vozidel brání výkon a cena baterií a také získávání elektrické energie pro jejich pohon. Naopak vozidla se spalovacími motory nejsou příliš šetrná k životnímu prostředí. Politický tlak na automobilky, vyrábět ekologické automobily, nutí hledat alternativní řešení. Jedním z řešení jsou i hybridní vozidla. Nejedná se o žádné nové řešení pohonu vozidla, jelikož první hybridní vozidlo se objevilo na přelomu 20. stol. Hybridní technologie kombinuje dva různé typy pohonu, které se navzájem doplňují a využívají svých výhod. V současné době patří k nejrozšířenějšímu spojení spalovacího motoru a elektromotoru. Tento typ nemá sice nulové emise, ale dochází k jejich značnému omezení a zároveň nepotřebuje finančně nákladné baterie. Máme dva základní typy hybridních vozidel podle uspořádání spalovacího motoru a elektromotoru, a to sériové a paralelní. [32]

5.1. Sériový hybrid

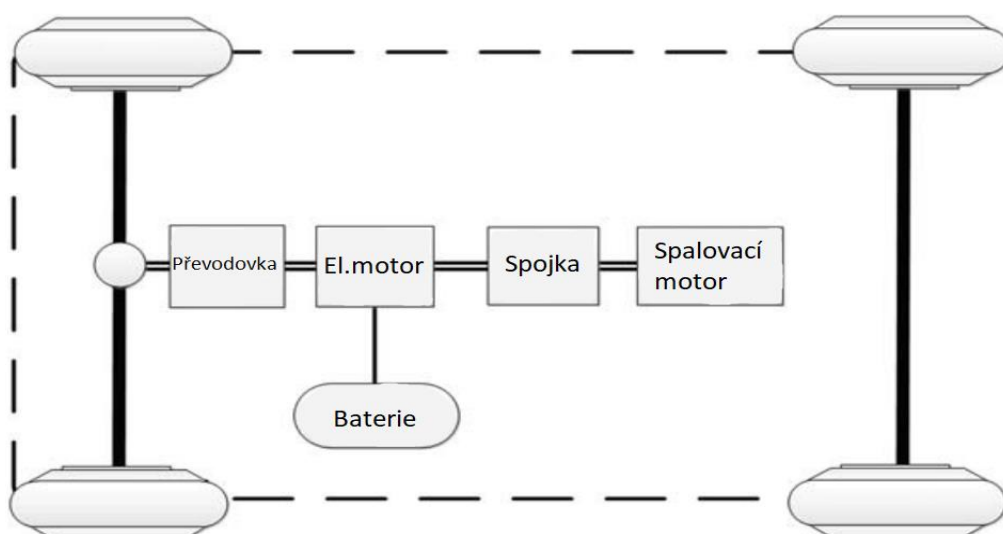
U tohoto typu zapojení se na pohonu podílí pouze elektromotor, zatímco malý spalovací motor pohání generátor a ten pohání elektromotor nebo ukládá energii do baterie. Jinými slovy, vozidlo pohání pouze elektromotor s baterií a spalovací motor generuje potřebnou energii na pohon. Spalovací motor není mechanicky propojen s hnanou nápravou, takže se na pohonu nemůže podílet. Schéma zapojení sériového motoru je na obrázku č. 33. Spalovací motor může tím pádem pracovat v oblasti s největší účinností a nejmenších emisí. Tím, že vozidlo pohání pouze elektromotor, není potřeba vícestupňová převodovka. Nicméně je potřeba dostatečně výkonný elektromotor (může pracovat i jako generátor při rekuperaci brzděné energie) a navíc i samostatný generátor. Také je možné využít dva menší elektromotory (případně čtyři pro pohon všech kol) pro pohon každého kola zvlášť a může se tak vynechat mechanický diferenciál. Nevýhodou je vícenásobná přeměna energie, z mechanické na elektrickou a poté zpět z elektrické na mechanickou, což vede ke zbytečným ztrátám. Sériové zapojení se využívá u diesel-elektrických lokomotiv nebo u terénních vozidel, kde má právě každé kolo svůj vlastní elektromotor. [32]



Obrázek 33: Sériové zapojení hybridního vozidla [32]

5.2. Paralelní hybrid

U paralelního hybridu je spalovací motor a elektromotor spojen s nápravou mechanicky. Na pohonu se mohou podílet buď oba motory současně, nebo pouze jeden z nich. Existuje více typů zapojení paralelního hybridu. Spalovací motor může pohánět jednu nápravu (přední) a elektromotor druhou (zadní) nebo jsou oba motory zapojeny za sebou, a pak může být umístění elektromotoru v celé hnací soustavě různé. Elektromotor může být umístěn za převodovkou nebo před ní. Možností jednotlivých zapojení je více, na obrázku č. 34 je klasické paralelní zapojení pomocí jedné hřídele. Výhodou je vyšší účinnost pohonu zejména pro dálniční provoz. [32]



Obrázek 34: Paralelní zapojení hybridního vozidla [32]

Existuje také spojení sériového a paralelního hybridu, který využívá výhod jednotlivých zapojení, tzv. sériově – paralelní (kombinovaný) hybrid. Tento typ zapojení je technicky složitý a finančně nákladný. [32]

5.3. Stupeň hybridizace

Dnešní trh s automobily nabízí širokou škálu hybridních vozidel. Liší se od umístění elektromotoru až po samotné jízdní režimy a funkce. Základní HEV má oproti konvenčnímu vozidlu přidané komponenty, kterými jsou vysokonapěťová baterie, elektromotor, řídicí jednotka a DC-DC měnič. Samozřejmě, že u některých verzí HEV je potřeba i další součástky, jako např. AC-DC převodník apod. To vše má za důsledek zvýšení hmotnosti vozidla včetně ceny. Naopak HEV nabízí menší emise CO₂, s tím spojenou i nižší spotřebu paliva, což vede k vrácení vyšší počáteční investice za vozidlo. HEV můžeme rozdělit podle funkcí na čtyři základní skupiny, micro hybrid (S&S), mild hybrid (MHEV), full hybrid (FHEV) a plug-in hybrid (PHEV). Za micro hybrid by se dalo považovat každé vozidlo se systémem start-stop a rekuperaci brzdné energie. Naopak full hybrid se funkcí téměř blíží klasickému elektromobilu. Čím více se vozidlo blíží elektromobilu, tím jsou nároky na jednotlivé součástky větší (vyšší výkon elektromotoru, větší kapacita baterií,...) a tím roste i cena vozu. Jednotlivé typy HEV jsou rozděleny v následující tabulce č. 3 na základě funkcí. [33]

Tabulka 3: Srovnání funkcí u hybridních vozidel [33]

Funkce	S&S	MHEV	FHEV	PHEV
Start – stop systém	•	•	•	•
Přídavný asistent točivého momentu		•	•	•
Rekuperace brzdné energie	•	•	•	•
Jízda pouze na elektrický pohon			•	•
Nabíjení baterií během jízdy	•	•	•	•
Nabíjení baterií z elektrické sítě				•

System start-stop vypíná spalovací motor bez zásahu řidiče, když vozidlo stojí. Ve chvíli, kdy řidič vyšlápne spojku, systém motor opět nastartuje. Tento systém má za cíl snížení emisí a spotřebu paliva, zejména v kolonách a v městském provozu. Součástí systému u micro hybridních vozidel je funkce řízení energie. Jedná se o řízení elektrické energie, kdy se bude baterie nabíjet a kdy bude využívána k napájení elektrických spotřebičů. Baterie se dobíjí hlavně rekuperací, a tím pádem není potřeba odebírat takové množství energie z motoru na dobíjení baterií. Celkově systém zvyšuje efektivnost toku energie a její hospodaření. [33]

Další funkcí je přídatný asistent točivého momentu. Tato funkce se využívá při rozjezdu vozidla. Ve chvíli, kdy řidič sešlápne plynový pedál, je potřeba dodat více točivého momentu. To můžeme dosáhnout pomocí elektromotoru, který dodá potřebný moment. Dojde opět ke snížení spotřeby paliva a zároveň může vozidlo mnohem dynamičtěji akcelarovat, díky charakteristickým vlastnostem elektromotoru, viz výše. [33]

Rekuperace brzděné energie využívá kinetickou energii vozidla k pohánění elektromotoru, který následně generuje elektrickou energii a zároveň vozidlo deceleruje. Množství vyrobené energie, v souvislosti se silou zpomalující vozidlo, je závislé na výkonu elektromotoru. Každá automobilka má nastavenou rekuperaci odlišným způsobem. [33]

Jízda pouze na elektrický pohon vyžaduje dostatečně výkonný elektromotor. V tomto módu je spalovací motor vypnut a o pohon se stará pouze elektromotor. U FHEV se většinou tento mód využívá při rychlostech do 30 km/h vzhledem k nízké kapacitě baterií. PHEV nejsou tolik limitována bateriemi a je možné pohánět vozidlo v elektrickém módu i při vyšších rychlostech. [33]

Jelikož hybridní vozidla mají oproti konvenčním vozidlům výkonnější baterie, je potřeba řídit jejich nabíjení. Každá baterie má určitou hladinu (state of charge SOC), pod kterou se nesmí vybit a zabrání tak permanentnímu poškození. Proto je potřeba míru vybití hlídat a případně dobíjet baterie, aby nedošlo k vybití pod danou úroveň. Hodnota SOC závisí na chemickém složení, velikosti a výkonu baterie. [33]

Pouze PHEV umožňují své baterie dobíjet z elektrické sítě. Vozidlo obsahuje usměrňovač, který ukládá elektrickou energii ze zásuvky do vysokonapěťové baterie.

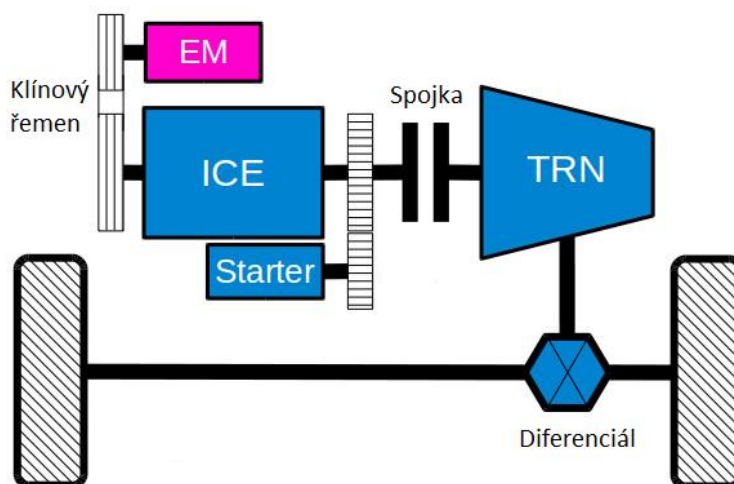
5.4. Umístění elektromotoru v hnací soustavě

Jak je již zmíněno výše, u paralelního typu zapojení HEV je možné umístit elektromotor (EM) na různé místo v hnací soustavě. Jelikož hybridní vozidla většinou vznikají z konvenčních automobilů, může se u nich zkoumat několik parametrů, jako např. náročnost zástavy, do jaké míry se dokáže elektromotor podílet na pohonu vozidla nebo finanční náročnost. Jednotlivé varianty zástavy elektromotoru se značí P0 - P4. První dvě varianty (P0 a P1) mají

elektromotor přímo propojen se spalovacím motorem (ICE), zatímco u ostatních skupin (P2, P3 a P4) může být elektromotor mechanicky odpojen od spalovacího motoru pomocí spojky. [34]

5.4.1. Integrovaný elektromotor pomocí klínového řemene – P0 (Belt integrated starter generator BiSG)

Tato typologie zapojení je velice snadná, protože konvenční hnací soustava zůstane bez většího zásahu. Klasický 12 V alternátor se nahradí zpravidla 48 V elektromotorem (generátorem). Elektromotor je spojen se spalovacím motorem pomocí klínového řemene. Umístění elektromotoru je patrné na obrázku č. 35. Jedná se o technicky nejméně náročnou přestavbu a zároveň je cenově nejefektivnější. Původní startér zde musí být zachován, jelikož klínový řemen nedokáže přenést dostatek točivého momentu pro studené nastartování vozidla. Elektromotor se nedá odpojit od spalovacího motoru, a tak dochází ke ztrátám během rekuperace. Elektromotor je schopen dodávat točivý moment a zvýšit dynamiku akcelerace. V dnešní době je mnoho společností, např. Bosch, Continental, Valeo, které nabízí přídatný systém pro konvenční automobily. Přídatný systém se obvykle skládá z elektromotoru (generátoru), přídatné 48 V baterie, DC/DC měniče, řídicí jednotky a 12 V baterie. Tento způsob přestavby se stal mezi automobilkami oblíbený, díky malé finanční náročnosti a také dostatečnému snížení emisí CO₂. [34]

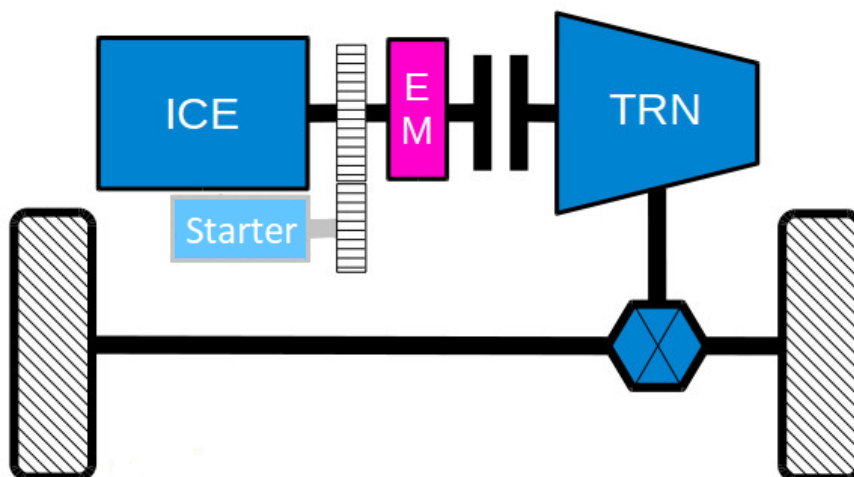


Obrázek 35: Umístění elektromotoru – P0 [34]

5.4.2. Integrovaný elektromotor na klikové hřídeli – P1

Tato varianta má elektromotor spojený se spalovacím motorem přímo na klikové hřídeli. Nahrazuje klasický 12 V alternátor a může pracovat také jako startér. Schéma zapojení jednotlivých komponentů je na obrázku č. 36. Oproti předchozí variantě BiSG nedochází mezi elektromotorem a konvenčním motorem k výrazným ztrátám (není skluz jako u klínového řemene) a elektromotor může přenést více točivého momentu. Tato přestavba vyžaduje změny

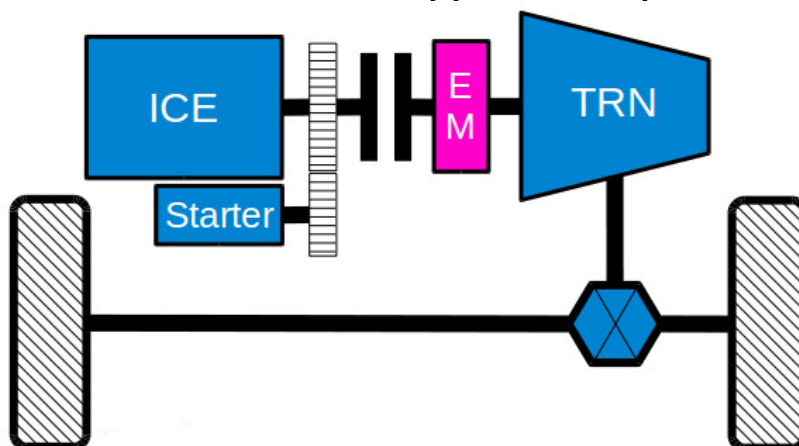
v hnací soustavě u konvenčního vozidla. Jsou zde také vyšší požadavky na elektromotor, protože není žádný poměr otáček a rychlosti na klikové hřídeli mezi spalovacím motorem a elektromotorem. Další velkou nevýhodou je vyšší cena přestavby konvenčního vozidla na HEV. [34]



Obrázek 36: Umístění elektromotoru – P1 [34]

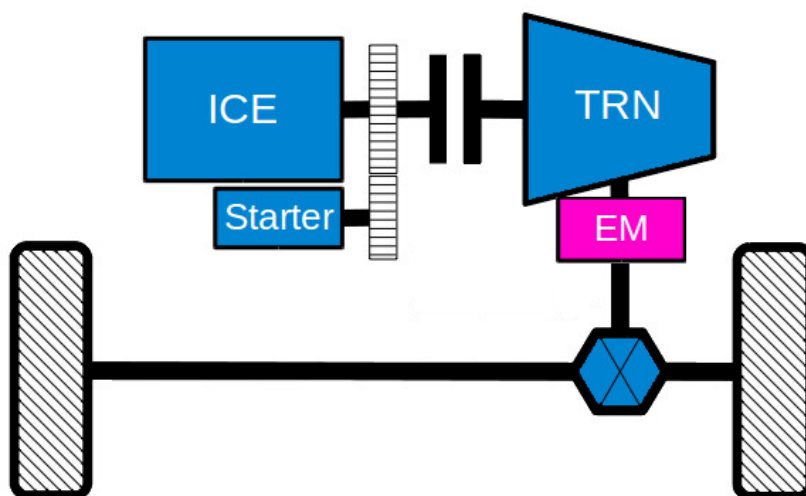
5.4.3. Integrovaný elektromotor mimo spalovací motor – P2, P3, P4

Zbývající varianty přestavby si popíšeme současně, protože jsou si velice podobné. Hlavní rozdíl od předchozích typů je oddělitelnost od spalovacího motoru. Díky tomu, že nejsou závislé na spalovacím motoru, je jejich efektivnost při rekuperaci nebo při navýšení točivého momentu vyšší. Tím, že jsou umístěny dále od konvenčního motoru a dají se od něho odpojit, mohou rekuperovat energii, i když je spalovací motor vypnutý. U varianty P2 je elektromotor umístěný na vstupu do převodovky (TRN) a může být spojen pomocí klínového řemene nebo soustavou ozubených kol. V P3 uspořádání je elektromotor připojen u převodovky na výstupní straně. Poslední varianta P4 má elektromotor připevněný na nápravě vozidla nebo může být namontován přímo do kola. Jednotlivé varianty jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

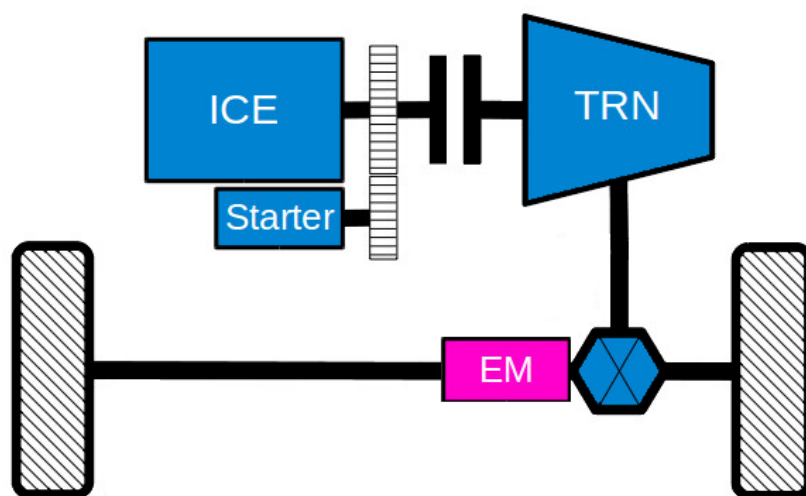


Obrázek 37: Umístění elektromotoru – P2 [34]

Všechny tyto typy jsou náročné na zástavbu do vozidla, což nese i vyšší finance na přestavbu. Dále je potřeba výkonnějšího startéru na funkci start–stop. Je možné také kombinovat jednotlivé varianty, a například do jednoho vozidla namontovat variantu P0 a P4. [34]



Obrázek 39: Umístění elektromotoru – P3 [34]



Obrázek 38: Umístění elektromotoru – P4 [34]

Následující tabulka č. 4 shrnuje všechny základní informace o jednotlivých variantách přestavby konvenčního vozidla na HEV.

Tabulka 4: Srovnání možností přestavby vozidel [34]

Kategorie umístění EM	P0	P1	P2, P3, P4
Funkce (HEV mód)	Systém Start – Stop Přídavný točivý moment Řízení toku energie Rekuperace brzdné energie Úsporná jízda (plachtění)	Systém Start – Stop Přídavný točivý moment Řízení toku energie Rekuperace brzdné energie Úsporná jízda (plachtění)	Systém Start – Stop Přídavný točivý moment Rekuperace brzdné energie Úsporná jízda (plachtění) Pouze elektrická jízda
Výhody	Nízká cena integrace komponent Možnost vzduchového i kapalného chlazení elektromotoru Menší velikost součástek	Vyšší efektivita Absence 12 V startéru	Vysoká efektivita Elektrická jízda Možnost pohonu všech kol (P4) Vysoká účinnost rekuperované energie
Nevýhody	Ztráty točivého momentu vzniklé klínovým řemenem Nízká efektivita rekuperace brzdné energie	Nízká efektivita rekuperace Vyšší cena jednotlivých částí Vliv na konvenční architekturu Vyšší nároky na elektromotor	Nutný další elektromotor (výkonnější startér) pro systém Start – Stop Výrazný vliv na konvenční architekturu Vysoká cena přestavby
Shrnutí	Schopnost zvýšit točivý moment: střední Rekuperace el. energie: střední Jízda čistě na elektřinu: není možná Přestavba: snadná Efektivnost přestavby: střední	Schopnost zvýšit točivý moment: vysoká Rekuperace el. energie: střední Jízda čistě na elektřinu: teoreticky možná Přestavba: složitá Efektivnost přestavby: vysoká	Schopnost zvýšit točivý moment: vysoká Rekuperace el. energie: vysoká Jízda čistě na elektřinu: možná Přestavba: složitá Efektivnost přestavby: vysoká

6. Přídavný elektrický systém pro konvenční vozidla

6.1. Příklady přídavných systémů

Trh s elektromobily a hybridními vozy postupně čím dál více roste. Mezi hybridními vozy na popularitě nejvíce získalo zapojení P0 pro mild hybridy, viz výše. V současné době je mnoho společností, které nabízejí systémy na přestavbu konvenčního vozidla. Nyní si uvedeme pár příkladů nabízených přídavných systémů pro konvenční automobily.

6.1.1. Valeo 48 V MHEV systém

Přídavný systém od společnosti Valeo obsahuje 48 V lithium iontové baterie, startér-alternátor 48 V s řídicí jednotkou a DC-DC měnič. Nabízí možnost přidání do systému 48 V turbodmychadlo pro větší jízdní dynamiku. Celý systém umožňuje rekuperaci energie během brždění, asistenci přídavným točivým momentem při akceleraci a je vybaven systémem Start – Stop. Společnost Valeo uvádí snížení emisí CO₂ a úsporu paliva o 20 %. [35]

6.1.2. Continental 48 V MHEV systém

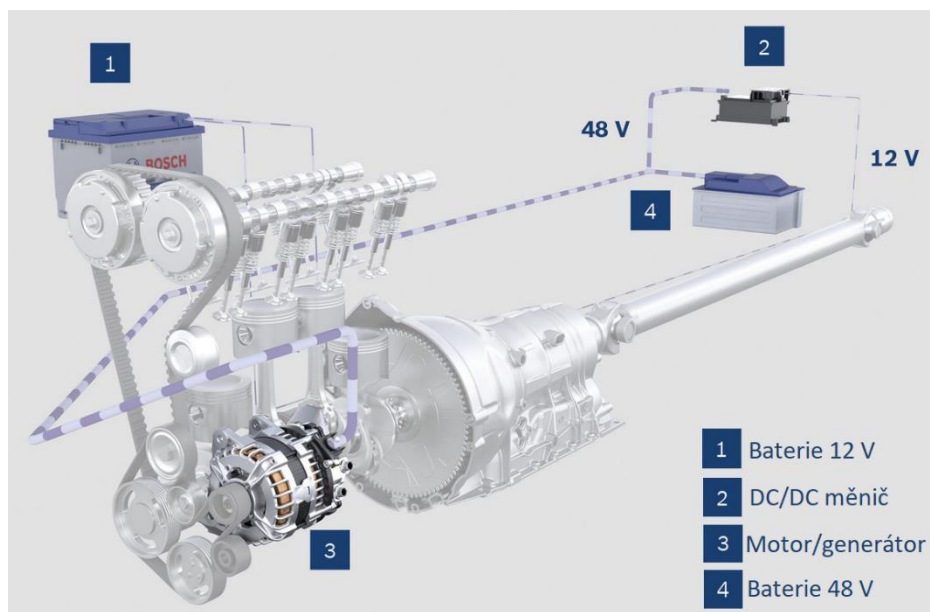
Poprvé společnost Continental implementovala tento systém do vozidla Renault Scénic s diesellovým motorem. Systém je opět složen z elektromotoru 48 V, přídavného 48 V akumulátoru a DC-DC měniče napětí. Systém obsahuje Start – Stop systém, asistenta při akceleraci a tzv. režim „plachtění“, kdy vozidlo umí udržovat stejnou rychlost na rovině bez pomoci spalovacího motoru. Podle firmy Continental dojde v městském provozu k úspoře paliva až 21 % a snížení emisí o 10 %. [36]

6.1.3. Delphi 48 V MHEV systém

Podobně, jako předchozí systémy, i tento systém obsahuje 48 V startér-generátor, lithium-ion baterii a DC-DC měnič. Tento systém používá AC elektromotor, a proto je potřeba navíc AC/DC měnič. Přídavný systém obsahuje i turbodmychadlo, které poskytuje o 50 % vyšší točivý moment. Společnost Delphi uvádí velké navýšení výkonu, snížení CO₂ o 25 % a úsporu spotřeby paliva o 15 %. Systém nabízí velmi hladký a výkonnější rozjezd. Delphi uvádí, že v roce 2025 bude každé desáté vozidlo právě 48 V MHEV. [37]

6.1.4. Bosch 48 V MHEV systém

Poslední systém, o kterém je psáno, je od jedné z největších společností v automobilovém průmyslu. Firma Bosch představila také svůj přídavný systém pro konvenční vozidla. Schéma zapojení jednotlivých komponentů je zobrazen na obrázku č. 40. Tento systém byl představen v roce 2017 na velmi populárním vozidle Volkswagen Golf. Nabízí stejné jízdní režimy a systémy jako předchozí jmenované varianty. [38]



Obrázek 40: Přídavný 48 V systém Bosch [34]

6.2. Návrh přídavného elektrického systému

Přídavný systém se využívá zejména ve chvíli, kdy je chod spalovacího motoru nevýhodný. Zároveň umožňuje lépe hospodařit s přebytečnou energií v konvenčním vozidle. Hlavním cílem je snížit množství vyprodukovaných škodlivých látek, a tím i spojenou nižší spotřebu paliva. Systém nabízí ovšem i vyšší jízdní dynamiku. Nicméně tyto benefity vedou k mírnému nárůstu hmotnosti a ceny vozidla. Systém s těmito komponenty je navržen pro vozidla nižší nebo střední třídy (Škoda Fabia, Octavia, Volkswagen Golf, Passat, ...). V případě použití ve vyšší třídě nebo u luxusních vozů je potřeba použít výkonnější komponenty, zejména elektromotor a DC-DC měnič, který bude schopný dodávat dostatek energie pro palubní 12 V síť. Je zde také možnost nahradit některé konvenční elektrické spotřebiče napájených 12 V za 48 V spotřebiče, např. kompresor, čerpadla, posilovače. Vyšší napětí nám umožňuje přenést více energie do spotřebičů. Za předpokladu, že by výkon spotřebičů zůstal stejný, snížil by se proud, a tak by došlo k úspoře na kabeláži.

6.2.1. Komponenty přídavného systému

Přídavný systém se bude skládat, podobně jako zmíněné příklady, z přídavného 48 V startér – generátoru, 48 V akumulátoru, řídicí jednotky a DC-DC měniče. Tyto čtyři základní komponenty tvoří kostru přídavného systému. Aby mohl být systém implementován do vozidla, je potřeba upravit další komponenty, např. kabeláž, klínový řemen, úchyty atd. Nejprve si podrobněji popíšeme hlavní části, elektromotor a akumulátor. Elektromotor bude fungovat jako startér – generátor. Jedná se o synchronní motor s permanentními magnety. Elektromotor o výkonu 5-14 kW a točivém momentu 38 N.m bude napájen 48 V. Kontinuální odběr je 100 A, krátkodobě může být až 350 A po dobu 30 sekund. Výrobci elektromotoru

uvádí hmotnost okolo 10 kg. O napájení elektromotoru se bude starat 48 V bateriový modul, složený z lithium titanových článků s nominálním napětím 2,1 V a kapacitou 33,8 Ah. Ten je schopný poskytnout vybíjecí proud až 350 A. Životnost článku se pohybuje okolo 15 000 cyklů nebo 25 let. Požadované napětí 48 V dosáhneme sériovým zapojením 23 článků. Vznikne akumulátorový modul o hmotnosti okolo 29 kg. Řídící jednotka má na starost chod elektromotoru a ovládá nabíjení akumulátorů. Je programovatelná, tudíž umožňuje nastavit vlastnosti a jízdní režimy individuálně dle vozidla. DC-DC měnič převádí napětí z 48 V sítě na 12 V. Možný kontinuální výstupní proud z měniče je 50 A a krátkodobě až 70 A. Podrobné parametry jednotlivých částí přídatného systému jsou uvedeny v následujících tabulkách. Jsou v nich porovnány komponenty vhodné pro přídatný systém. Komponenty vyznačené v tmavém rámečku byly vybrány na přestavbu vozidla.

Tabulka 5: Srovnání baterií

Baterie	Lithium-železo-fosfát článek [57]	Nano Lithium-titan článek	Altairnano Lithium-titan 24 V modul [17]	Nano Lithium-titan článek 48 V modul
Napětí [V]	3,2 V	2,1 V	17 V - 27.5 V	48,3 V (23 článků)
Kapacita [Ah]	40 Ah	33,8 Ah	67,4 Ah	33,8 Ah
Energetická hustota [Wh/l]	220 Wh/l	140 Wh/l	108 Wh/l	140 Wh/l
Max. kontinuální vybíjecí a nabíjecí proud [A]	120 A	330 A	500 A	330 A
Specifický výkon (nabíjení; vybíjení) [W/kg]		2380 W/kg; 1240 W/kg	1296 W/kg; 806 W/kg	2380 W/kg; 1240 W/kg
Specifická energie [Wh/kg]	100 Wh/kg	63,7 Wh/kg	51,8 Wh/kg	63,7 Wh/kg
Provozní teplota [°C]	od -20 °C do 65 °C	od -50 °C do 60 °C	od -50 °C do 65 °C	od -50 °C do 60 °C
Životnost [rok]	> 10 roků	25 roků	25 roků	25 roků
Počet životních cyklů-100 % DOD [cyklů]	>2000 cyklů (80 % DOD)	>15000 cyklů	>25000 cyklů	>15000 cyklů
Váha [kg]	1,65 kg	1,23 kg	28 kg	28,29 kg
Rozměry [délka/šířka/výška]	126 x 46 x 190 mm	130 x 21 x 210 mm	279 x 159 x 333 mm	2x 252 x 130 x 210 mm
Cena	91 USD (2200 Kč)	2 000 Kč	2750 USD (65000 Kč)	46 000 Kč

Tabulka 6: Srovnání elektromotorů

Elektromotor Parametry	HPM-50B BLDC [58]	MARS BLDC [59]	Motenergy ME1117 PMAC [60]	Motenergy ME1114 Brushless [61]
Napětí [V]	48 V	48 V	24 V-48 V	24 V-72 V
Výkon [W]	3 kW-7,5 kW	2 kW-7 kW	5 kW- 14 kW	10 kW-24 kW
Proud napájení (max. proud) [A]	100 A (300 A)	100 A (300 A)	100 A (300 A)	180 A (600 A)
Točivý moment [N.m]		19,1 N.m	38 N.m	88 N.m
Max. otáčky [otáčky/minutu]	6000 ot./min.	5000 ot./min.	5000 ot./min.	5000 ot./min.
Účinnost [%]	88 %	85 %	90 %	92 %
Hmotnost [kg]	11 kg		10 kg	16 kg
Rozměry [průměr]	206 mm	201 mm	203 mm	
Chlazení	vzduchem	vzduchem	vzduchem	vzduchem
Cena	446 USD 11000 Kč	17 990 Kč	615 USD 15000 Kč	1050 USD 25000 Kč
Pozn.				řídící jednotka zabudována

Tabulka 7: Srovnání DC-DC měničů

DC-DC měnič Parametry	DC měnič [62]	YUCOO [63]	IDEALPLUSING [64]	IDEALPLUSING [65]	YK [66]
Vstupní napětí [V]	30 V-60 V	48 V	48 V	24 V	24 V
Výstupní napětí [V]	12 V	12 V	12 V	12 V	12 V
Výkon [W]	300 W	600 W	1500 W	1020 W	720 W
Proud [A]	25 A	50 A	125 A	85 A	60 A
Cena	990 Kč	42 USD 1000 Kč	382 USD 9000 Kč	57 USD 1400 Kč	45 USD 1000 Kč

Tabulka 8: Srovnání řídicích jednotek elektromotoru

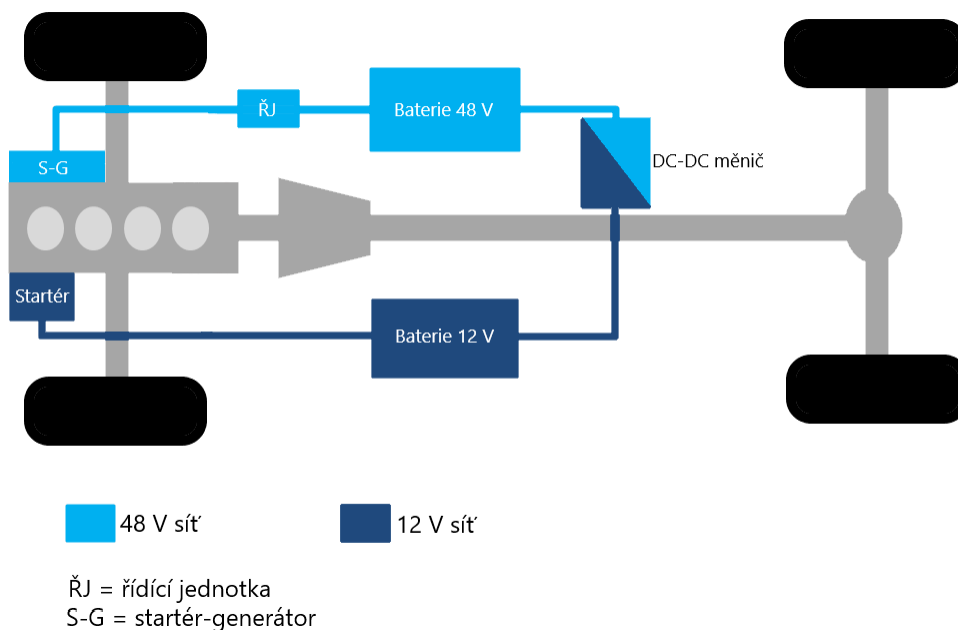
Řídící jednotka Parametry	KELLY KLS-N SIN WAVE [67]	VEC 300 [58]	Sevcon Gen 4 [68]
Napětí [V]	30 V-72 V	48 V	36 V-48 V
Proud [mA]	30 mA	20 mA-40 mA	
Kontinuální proud – výstup [A] (max. proud)	100 A (350 A)	200 A	330 A
Cena	9 000 Kč	452 USD 11000 Kč	575 USD 14000 Kč

6.2.2. Přestavba konvenčního vozidla

Na konvenčním vozidle nedojde k žádné zásadní změně. Přestavba na MHEV je podobná již zmíněné P0 architektuře. Původní alternátor, který obstarával dobíjení akumulátoru a napájení všech spotřebičů, bude vyměněn za zmíněný startér – generátor. Ten bude se spalovacím motorem propojen pomocí klínového řemene. Původní 12 V síť zůstane beze změny. Elektromotor bude dobíjet 48 V přídatnou baterii, ze které bude přes DC-DC měnič napájena 12 V síť a 12 V baterii. Tato baterie zůstane ve vozidle společně s konvenčním 12 V startérem kvůli studenému startování, protože u řemenu dochází ke skluzu a elektromotor by nedovedl převést dostatek energie na nastartování motoru. Řídicí jednotka, napojená na elektromotor a oba akumulátory, určuje chod energie podle aktuálního stavu nabití a jízdního režimu vozidla. Ta je společně s 48 V akumulátorem umístěna místo náhradního rezervního kola v zavazadlovém prostoru.

Většina automobilů má rezervní kolo položeno v podlaze zavazadlového prostoru. Akumulátor s řídicí jednotkou by se umístily právě na toto místo. Celý systém přidá na váze vozidla asi 45 kg, ovšem díky absenci rezervního kola a alternátoru nebude nárůst hmotnosti tak značný. Celkové náklady za materiál pro přídatný systém byly vypočítány na přibližně 75 700 Kč. Podrobnější kalkulace nákladů je provedena v tabulce č. 9. Kalkulace obsahuje pouze ceny jednotlivých komponent a k celkové ceně je nutné ještě uvážit cenu za práci na přestavbu vozidla. Schéma zapojení jednotlivých komponent ve vozidle je zobrazeno na obrázku č. 41.

[34]



Obrázek 41: Schéma elektrické sítě vozidla s přídatným hybridním systémem [69]

6.2.3. Jízdní režimy

Přídavné řešení nabízí několik nových jízdních režimů oproti konvenčnímu vozidlu. Tím základním je funkce Start-Stop. Startování studeného motoru obstarává klasický 12 V startér s 12 V baterií. Při zahřátí motoru je vozidlo schopné nastartovat mnohem tišeji a rychleji i přídavný systém. V kolonách nebo při zastavení na semaforu dojde k vypnutí spalovacího motoru a při zařazení rychlostního stupně dojde opět k jeho hladkému nastartování pomocí 48 V systému. Největší spotřeba paliva a nejvíce vypuštěných látek do ovzduší je při rozjezdu vozidla. Proto je zde asistence elektromotoru velmi platná. Při akceleraci dokáže elektromotor dodat navíc točivý moment, což vede k větší dynamice, rychlejšímu rozjezdu a zároveň ke snížení spotřeby paliva i emisí. Při rychlosti v rozmezí od 50 km/h do 120 km/h (záleží na vozidle a nastavení řídicí jednotky) dojde ke krátkodobému vypnutí spalovacího motoru (40 sekund) a po uplynutí doby nebo při sešlápnutí plynového pedálu ho elektromotor hladce opět nastartuje. Další funkcí, kterou přídavný systém disponuje, je rekuperace brzdové energie. Ve chvíli, kdy sešlápneme brzdový pedál, kinetická energie z kol pohání elektromotor a ten začne generovat elektrickou energii, která se následně ukládá do baterie. Díky rekuperaci nedochází k opotřebenosti brzdového systému, zejména brzdových destiček, a využije se jinak přebytečná energie.

Tabulka 9: Kalkulace nákladů na přestavbu vozidla

Položka	Produkt	Název	Specifikace	Jednotková cena	Počet	Celková cena	Podíl % na nákladech	Poznámka	Hmotnost [kg]
1	Elektromotor	Motenergy ME1117 PMAC	5-14 kW; 100 A	15 000 Kč	1	15 000 Kč	19,82 %	Electric Motorsport	10 kg
2	Akumuátor	Nano lithium-titan článěk	33,8 Ah; 100 A	2 000 Kč	23	46 000 Kč	60,77 %		28,3 kg
3	Řídící jednotka	KELLY KLS-N SIN WAVE	100 A	9 000 Kč	1	9 000 Kč	11,89 %	eSkutr	1 kg
4	DC-DC měnič		48 V-12 V; 50 A	4 200 Kč	1	4 200 Kč	5,55 %	YUCOO	1,5 kg
5	Ostatní			1 500 Kč	1	1 500 Kč	1,98 %	Kabely, úchyty atd.	2 kg

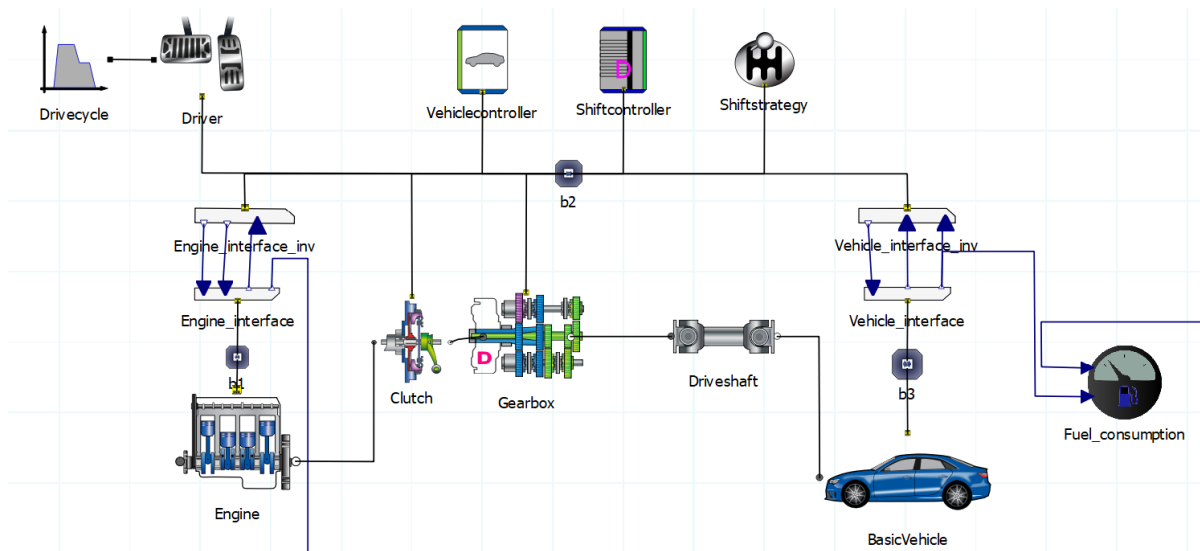
Náklady celkem	Hmotnost celkem
75 700 Kč	42,8 kg

7. Porovnání spotřeby paliva mezi konvenčním a MHEV

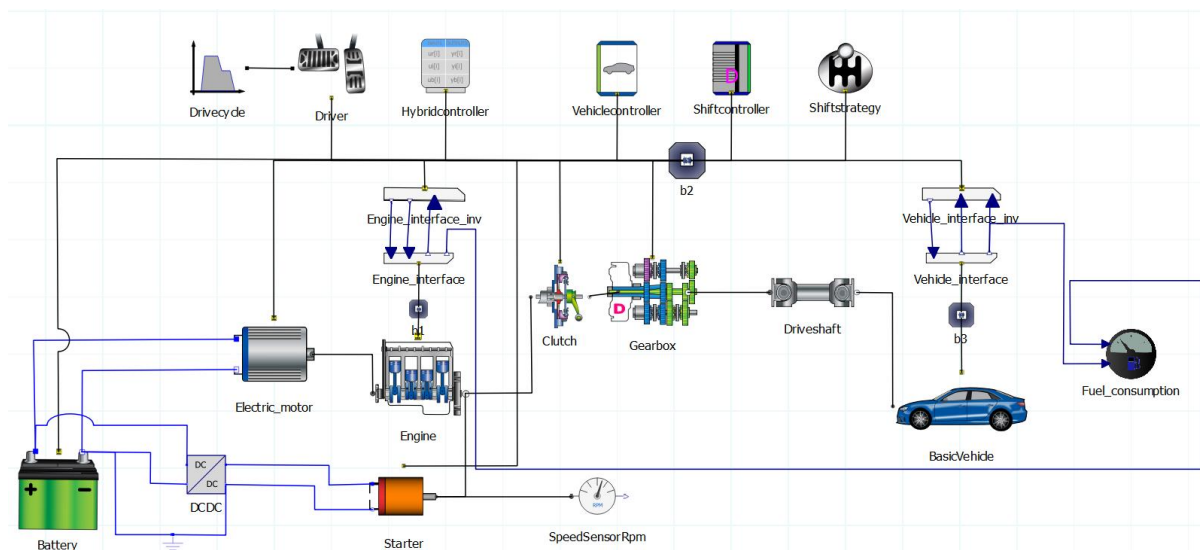
Poslední částí této práce je porovnání spotřeby paliva mezi konvenčním vozidlem a vozidlem s přídatným 48 V systémem. Každé vozidlo bude simulovat jízdu na základě WLTC (World Harmonized Light Vehicle Duty Test Cycle) cyklu. Tento cyklus je součástí WLTP (World Harmonized Light Vehicles Test Procedures) měření emisí a spotřeby paliva u vozidel. Každé vozidlo má uvedenou spotřebu paliva a emisní hodnoty právě na základě tohoto testování. WLTP testování se skládá z laboratorního měření (WLTC) a jízdy v reálném provozu (RDE). Od roku 2017 toto měření nahrazuje postupně zastaralé NEDC testování (New European Driving Cycle). Doba měření u WLTC cyklu je 1800 s a vozidlo při něm ujede 23,27 km. Průměrná rychlost vozidla je 46 km/h a maximální je 131 km/h. Cyklus se skládá ze 4 částí, které simulují městský a mimoměstský provoz. K vyhodnocení byl použit software Ignite od společnosti Ricardo. Pro simulaci byl sestaven model konvenčního vozidla, který byl následně přestaven na MHEV. Porovnání spotřeby paliva bylo provedeno před a po přestavbě.

7.1. Popis modelů použitých na simulaci

Model konvenčního vozidla nebyl sestaven na základě parametrů skutečného vozidla, ale pouze z reálných hodnot. Model vozidla se skládá ze základních částí hnací soustavy běžného vozidla. Jedná se o osobní automobil s hmotností 1350 kg. Mezi hlavní komponenty patří spalovací benzínový motor (Engine) s maximálním točivým momentem při 5100 otáčkách za minutu 218 N.m. Aby bylo možné zjistit spotřebu paliva, bylo potřeba nahrát do softwaru úplnou charakteristiku motoru. Dalšími komponenty hnací soustavy je spojka (clutch) a převodová skříň (gearbox). Pro tento model byla použita 6-ti stupňová manuální převodovka s přesně nadefinovanými podmínkami pro zařazení jednotlivých rychlostních stupňů. Ikona vozidla (basicvehicle) definuje základní parametry vozidla, jako valivý nebo aerodynamický odpor a již zmíněnou hmotnost vozidla. Dalšími komponenty modelu jsou ovladače a řídicí jednotky. Ikona drivecycle má nadefinovaný rychlostní profil trati podle WLTC měření a spotřeba paliva je vypočítána na základě tohoto profilu. Celý model konvenčního vozidla a zapojení jednotlivých komponent je zobrazeno na obrázku č. 42. Model MHEV má stejné zapojení a parametry jako konvenční vozidlo a je doplněn o komponenty přídatného systému. Jedná se o elektromotor, DC/DC měnič a lithium-titan baterii. Tyto komponenty jsou podrobně popsány výše. Oproti modelu konvenčního vozidla je zde navíc ovladač (hybridcontroller), který popisuje jízdní režimy vozidla. Tento ovladač umožňuje naprogramovat libovolné jízdní režimy podle potřeby. Pro tuto simulaci byly naprogramovány jízdní režimy popsané v kapitole 6.2.3. Zapojení a model MHEV je zobrazen na obrázku č 43.



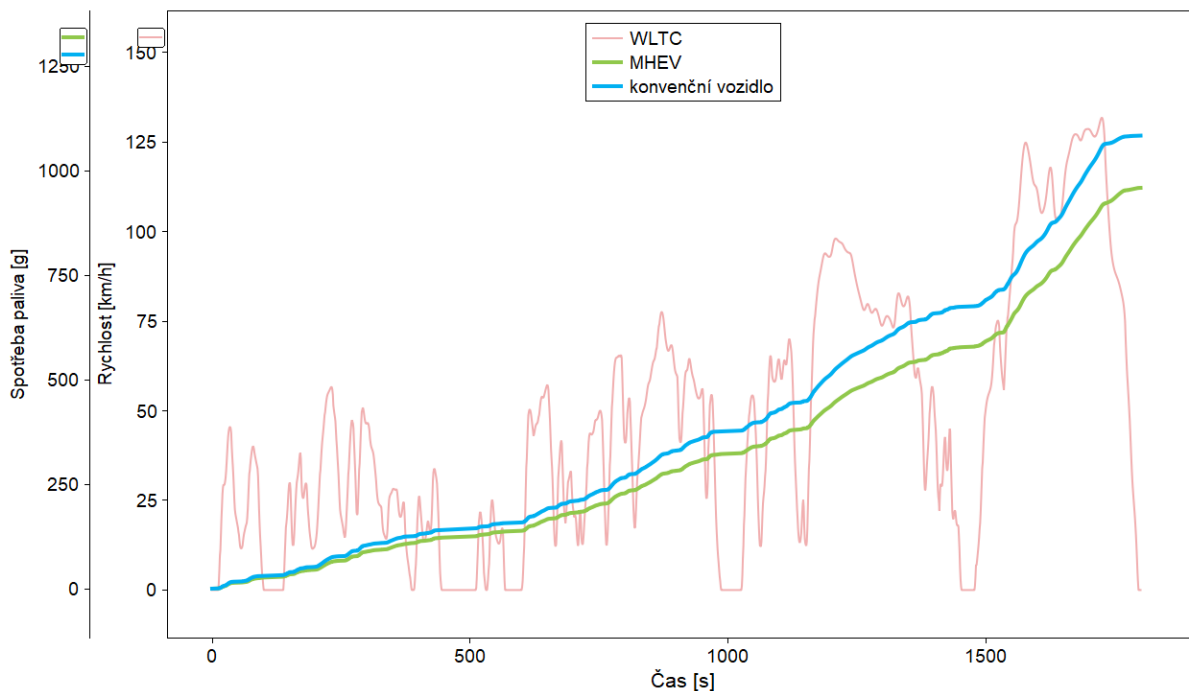
Obrázek 42: Model konvenčního vozidla



Obrázek 43: Model MHEV

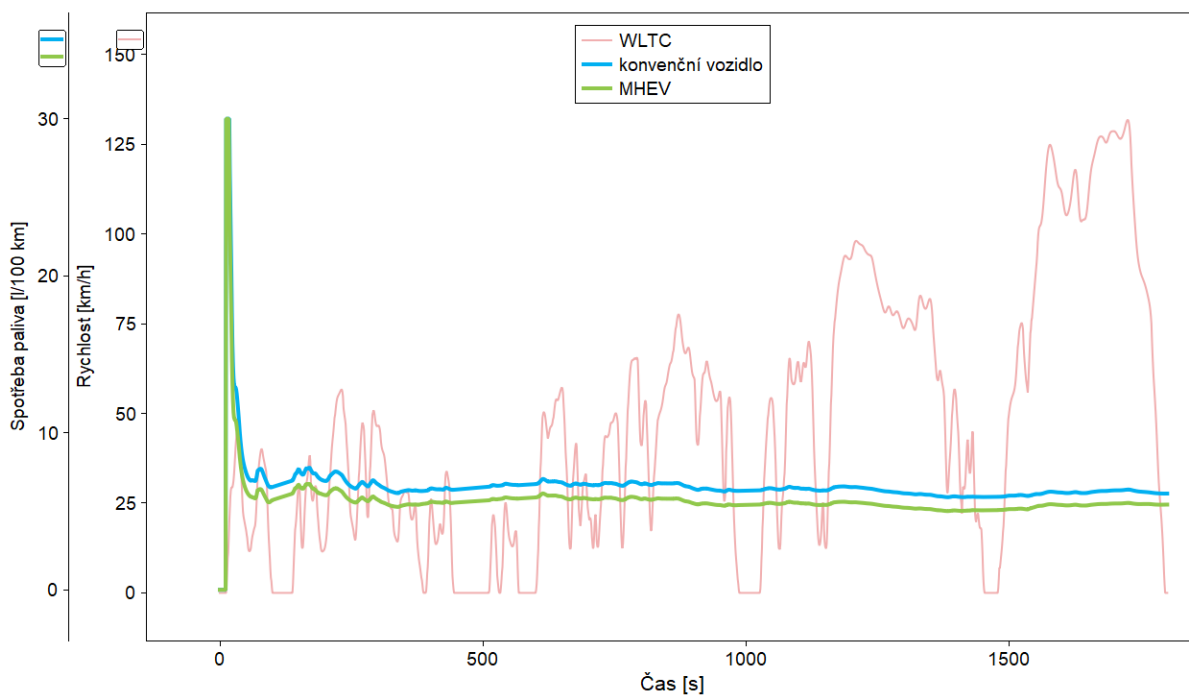
7.2. Porovnání spotřeby paliva mezi konvenčním a MHEV

Na základě charakteristiky motoru, která udává měrnou spotřebu paliva v gramech, je i první výsledek uveden v gramech. Jedná se o celkové množství spotřebovaného paliva na jedno měření. Graf znázorňuje průběh rychlosti WLTC cyklu a jednotlivé křivky spotřeby paliva pro konvenční vozidlo a MHEV. Konvenční vozidlo na jeden cyklus spotřebovalo 1084 g a MHEV 1010 g, což je o 74 g paliva méně. Průběh spotřeby paliva je zobrazen na obrázku č. 44.



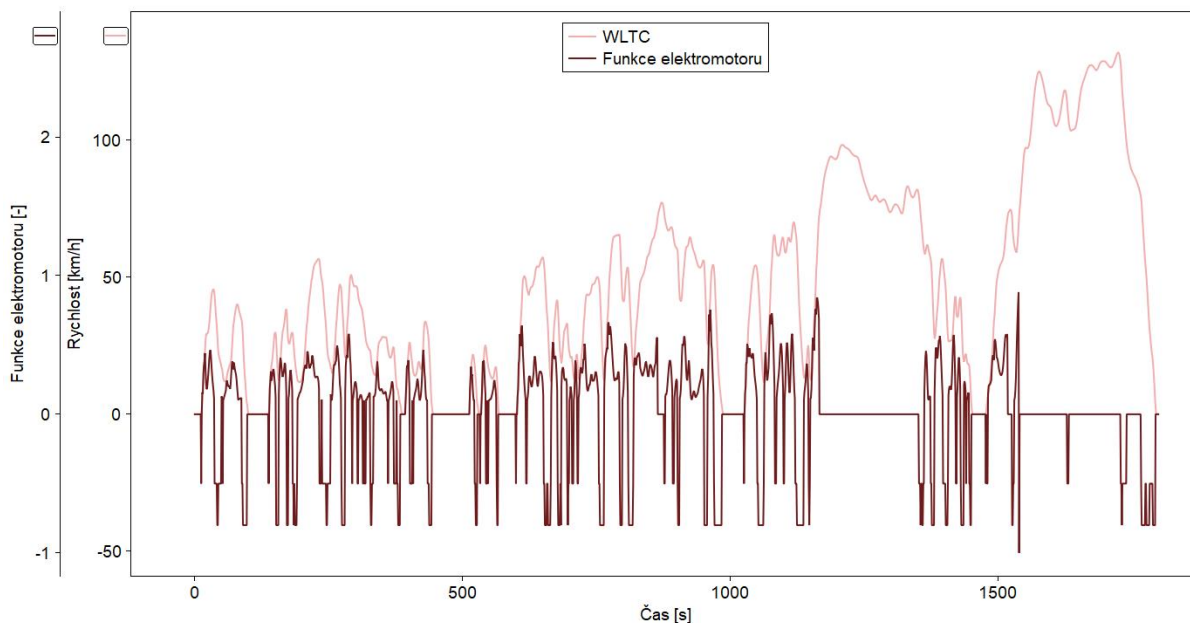
Obrázek 44: Průběh spotřeby paliva konvenčního vozidla a MHEV [g]

Další obrázek č. 45 udává spotřebu paliva přepočítanou na (pro nás známější jednotku) l/100 km. Konvenční vozidlo mělo průměrnou spotřebu paliva 6,13 l/100 km, zatímco u MHEV byla naměřena spotřeba 5,7 l/100 km. Nejvýraznější rozdíl spotřeby paliva, až 1 l/100 km, byl naměřen zejména při nižších rychlostech, tedy v městském provozu. Při nižších rychlostech se elektromotor využívá častěji.



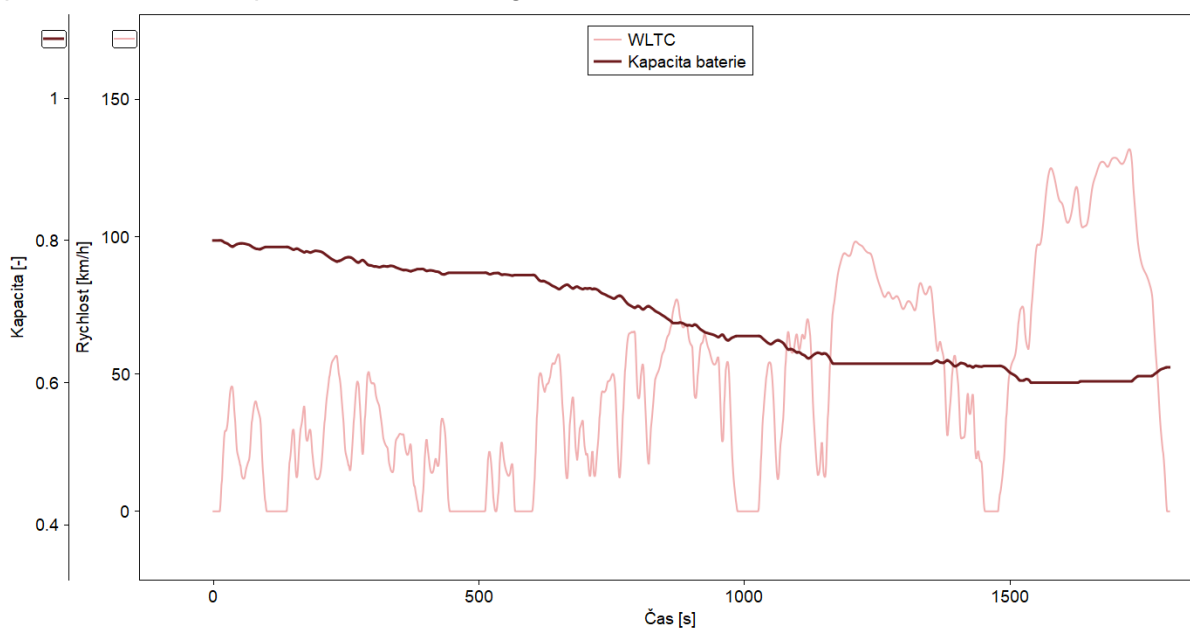
Obrázek 45: Průběh spotřeby paliva konvenčního vozidla a MHEV [l/100 km]

Funkci elektromotoru lze vyčíst i z následujícího obrázku č. 46. Ten udává, kdy se elektromotor podílel na pohonu, a kdy naopak generoval elektrickou energii a dobíjel baterie. Kladná hodnota představuje elektromotor podílející se na pohonu a záporná hodnota naopak na výrobě elektrické energie.



Obrázek 46: Průběh funkce elektromotoru

Obecně velkým problémem u vozidel poháněných elektrickou energií jsou baterie. Následující obrázek č. 47 poukazuje na vybíjení baterie během měření. Je patrné, že během využívání elektromotoru docházelo k vybíjení baterie a při jízdě vyšší rychlostí se nabíjela na 60 % své kapacity. Celkově během celého měření nedošlo k vybití baterie pod tuto hranici. Tato hranici je zvolena záměrně, aby se baterie nenabíjela na 100 % pomocí spalovacího motoru, ale pouze pomocí rekuperace brzděné energie.



Obrázek 47: Průběh spotřeby energie v baterii

Celkově došlo přestavbou konvenčního vozidla na MHEV k úspoře paliva o 8 %, což odpovídá téměř 0,5 l/100 km. Z naměřené spotřeby paliva lze odvodit množství škodlivých látek CO₂ vypuštěných do ovzduší. Ze známé spotřeby paliva l/100 km a složení látek v benzínu můžeme vypočítat množství CO₂ v g na km. Z toho tedy plyne, že konvenční vozidlo vypustilo 146 g CO₂/km, zatímco MHEV pouze 136 g CO₂/km. V roce 2020 má dojít opět ke zpřísnění emisních Euro norem na hodnotu 95 g CO₂/km. Na tuto hodnotu z daleka nedosáhne ani MHEV a bude opravdu velmi složité se k této hranici pomocí MHEV přiblížit. K výraznějšímu snížení paliva lze dosáhnout pouze zvýšením doby běhu elektromotoru. Při využití elektromotoru i při vyšších rychlostech lze dosáhnout spotřeby těsně nad 5 l/100 km, ovšem zde nastává problém v nedostatku kapacity baterie. Zvýšení kapacity baterie vede ke zvýšení ceny a také hmotnosti vozidla. Je tedy zřejmé, že MHEV sníží spotřebu paliva v městském provozu, kde je ovšem rekuperovaná brzdová energie nedostatečná pro opětovné nabití akumulátoru. MHEV by mohly najít své uplatnění zejména u menších vozidel s méně výkonnými motory.

Závěr

Evropská Unie se snaží určitým způsobem regulovat emise nejen v dopravě, ale ve většině průmyslových sektorů. Z hlediska dopravy je potíží s emisemi zejména v oblasti velkých měst, kde se pohybuje velké množství vozidel. Některá města k tomuto problému přistoupila radikálně a zpoplatnila vjezd do města vozidlům, která nespĺňují určitou emisní normu. EU za účelem snížení škodlivých látek, zejména CO₂, vypuštěných do ovzduší, udává hodnoty, které by nemělo vozidlo překročit. V poslední době došlo hned k několika změnám, co se týče samotných hodnot nebo způsobu měření emisí u vozidel. Tyto úpravy emisí mají hned několik důvodů.

Hlavním důvodem zavádění emisních norem je celkové snížení emisí v dopravě. Díky emisním normám dojde ke snížení množství škodlivých látek vypuštěných do ovzduší v silniční dopravě. Způsobů, jak snížit emise u vozidel není příliš. Aby vozidlo splňovalo emisní limit, je potřeba sáhnout po alternativním řešení pohonu vozidla. Konvenční vozidla se spalovacím motorem nedokážou dosáhnout na tyto hodnoty, a proto dochází k velkému nárůstu vozidel poháněných i elektrickou energií. Automobilky nebyly připravené na takové razantní změny, a tak musely sáhnout po alternativním pohonu, který je znám již několik let. Právě s elektromobilitou se do budoucna počítá nejvíce. Rozvoji elektromobility stojí v cestě hned několik překážek. Mezi ty zásadní patří akumulátory, síť dobíjecích stanic a samotná výroba elektrické energie. K tomu, aby se mohl elektromobil pohybovat, potřebuje elektrickou energii, kterou je potřeba někde vyrobit. Nejčastěji se vyrábí v elektrárnách spalováním fosilních paliv, které vypouštějí do ovzduší škodlivé látky podobně jako automobily. Nárůst elektromobilů sice vede ke snížení škodlivých látek v silniční dopravě, ovšem nevede ke globálnímu snížení emisí. V oblastech s vysokou hustotou dopravy dojde ke zlepšení přírodních podmínek. Naopak v oblastech, kde se nachází tepelné elektrárny, dojde k nárůstu škodlivých látek, protože bude potřeba vyrobit více elektrické energie pro elektrické vozy. Emisní normy tak zlepšují lokální podmínky, ovšem zdaleka nevyřeší tento problém v globálním měřítku. Aby došlo ke snížení emisí v globálním měřítku, je potřeba více využívat energii z obnovitelných zdrojů nebo jadernou energii, které vypouštějí minimální množství škodlivých látek do ovzduší.

Jedním, již zmíněným alternativním pohonem, jsou elektromobily a hybridní vozy. Tato práce se zabývá právě hybridními vozy. Byl proveden návrh přestavby konvenčního vozidla se spalovacím motorem na MHEV a poté porovnání spotřeby paliva (přepočítáno i na množství škodlivých látek CO₂) mezi konvenčním a MHEV. Pro simulaci nebylo použito žádné konkrétní vozidlo, ale vozidlo sestaveno z reálných hodnot se skutečnou charakteristikou motoru. Postavené vozidlo odpovídá vozidlům střední nižší třídy, jako je např. Škoda Octavia, Ford Focus, Volkswagen Golf nebo Opel Astra. Přídavný systém pro konvenční vozidlo byl sestaven

z volně dostupných komponentů. Do konvenčního vozidla byl přidán elektromotor, baterie, DC-DC měnič a řídicí jednotka. Simulace jízdy vozidla byla provedena v softwaru Ignite od společnosti Ricardo. V modelu bylo potřeba ještě naprogramovat jízdní režimy MHEV neboli nadefinovat jízdní podmínky, při kterých se bude elektromotor podílet na pohonu, nebo kdy bude generovat elektrickou energii. Průměrná spotřeba paliva byla vypočítána na základě WLTC jízdního profilu, který se používá dnes pro laboratorní testování vozidel. Celý přídatný systém nenavýší radikálně cenu vozidla, nicméně se na zvýšení ceny přídatného systému nejvíce podílí baterie. Ta tvoří více jak polovinu finančních nákladů přídatného systému. Baterie jsou v elektromobilitě zásadní překážkou bránící rychlejšímu rozvoji a tento problém bude potřeba do budoucna vyřešit nebo nahradit alternativním řešením např. palivovým článkem.

Porovnání spotřeby paliva mezi konvenčním vozidlem a MHEV ukázalo, že MHEV má nižší spotřebu o 0,43 l/100 km, což přibližně odpovídá 10 g CO₂/km. Výsledek poukazuje, že mild-hybridní vozidla mohou snížit spotřebu paliva, a s tím spojené i emisní hodnoty. Jsou tak šetrnější k životnímu prostředí. Tento přídatný systém je vhodný zejména pro městský provoz, kde vozidlo často stojí nebo jede nízkou rychlostí. Vzhledem k tomu, že se pro mild-hybridní vozidla používají méně výkonné elektromotory, neumožňují jízdu čistě na elektrický pohon, a tak jsou vhodné u vozidel s malým výkonem a nízkou hmotností. Aby automobilky splnily velmi přísné emisní normy, musejí vyvinout vozidlo s velmi nízkou spotřebou paliva, tudíž i emisemi. S MHEV je možné snížit spotřebu paliva o 10-15 %, nicméně to stále nestačí k dosažení požadovaných hodnot. Řešením by mohly být plně hybridní vozidla nebo přímo elektromobily, u kterých bude ovšem potřeba vyřešit již zmíněné překážky, než se budou moci rozšířit ve větším počtu.

Použitá literatura

- [1] SUNSHINE, Wendy Lyons. What Are Sources of Electricity That Charge Your Life? *ThoughtCo*. [online]. 2019 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/sources-of-electricity-1182554>
- [2] What is the source of the electricity we consume? *Shedding light on energy in the EU* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-3b.html>
- [3] Electricity and Energy Storage. *World nuclear association* [online]. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/electricity-and-energy-storage.aspx>
- [4] JIRSA, M. Supravodivost - naděje pro 21. století. *FZU* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-nadeje-pro-21-stoleti>
- [5] ŠRUBAŘOVÁ, Petra. Jak funguje superkapacitor? A jak může vylepšit baterie? *Tzbinfo* [online]. 2018 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/16916-jak-funguje-superkapacitor>
- [6] WOODFORD, Chris. Flywheels. *Explainthatstuff* [online]. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/flywheels.html>
- [7] DLOUHÝ, Petr a Markéta SOMOLOVÁ. VÝROBA VODÍKU. *HYTEP* [online]. 2007 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [8] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. TRANSPORT A SKLADOVÁNÍ VODÍKU. *HYTEP* [online]. 2007 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [9] ŠRUBAŘOVÁ, Petra. Jak funguje olověný akumulátor? *Tzbinfo* [online]. 2017 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [10] PESHIN, Akash. How Does A Galvanic Cell Work? *Science abc* [online]. 2019 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.scienceabc.com/innovation/galvanic-cell-work.html>
- [11] LARMINIE, James a John LOWRY. *ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGY EXPLAINED*. Second edition. United Kingdom: John Wiley, 2012, s. 30-78. ISBN 978-1-119-94273-3.
- [12] ŠRUBAŘOVÁ, Petra. Jak fungují palivové články? *Tzbinfo* [online]. 2018 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromotory-pohony-a-stroje/16987-jak-funguji-palivove-clanky>
- [13] Nickel-Zinc overview. *ZincFive* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.zincfive.com/nickelzinc-overview>

- [14] ONG, Thuy. Elon Musk's giant battery is now delivering power to South Australia. *The Verge* [online]. 2017 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2017/12/1/16723186/elon-musk-battery-launched-south-australia>
- [15] BECK, Anton. LITHIUM IRON PHOSPHATE VS. LITHIUM-ION: DIFFERENCES AND ADVANTAGES. *Epec* [online]. 2019 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://blog.epectec.com/lithium-iron-phosphate-vs-lithium-ion-differences-and-advantages>
- [16] DIOPAN, Václav. Lithium-titanátové baterie: opomíjená technologie s velkým potenciálem? *Hybrid.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/lithium-titanatove-baterie-opomijena-technologie-s-velkym-potencialem>
- [17] 24 V 70 AH BATTERY MODULE. *Altairnano* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://altairnano.com/products/battery-module/>
- [18] HOUSER, Pavel. Baterie lithium-kyslík to nebudou mít jednoduché. *Science mag.* [online]. 2018 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/baterie-lithium-kyslik-to-nebudou-mit-jednoduche/>
- [19] NOAK, Jens. Redox flow batteries for renewable energy storage. *Energy storage* [online]. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/blogs/redox-flow-batteries-for-renewable-energy-storage>
- [20] Hydrogen and energy storage expanding capacity. In: *Joiscientific* [online]. 2018 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.joiscientific.com/hydrogen-and-energy-storage-expanding-capacity/available-storage-technologies/>
- [21] DVOŘÁK, Petr a Petr Bača. Akumulace elektřiny. *Tzbinfo* [online]. 2011 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [22] Different Types of Batteries for your Car. *Sears* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.searsauto.com/car-care-101/different-types-of-batteries-for-your-car>
- [23] Fuel types of new cars: ACEA [online]. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.acea.be/press-releases/article/fuel-types-of-new-cars-petrol-11.9-diesel-3.7-electric-81.3-in-fourth-quart>
- [24] Why do we need gears? *X-engineer* [online]. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/drivetrain/transmissions/why-do-we-need-gears/>
- [25] EV design – electric motors. *X-engineer* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/electric-vehicles/ev-design-electric-motors/>

- [26] The Electric Motor. *Byjus* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://byjus.com/physics/the-electric-motor/>
- [27] OLLINS, Danielle. Are brushed motors suitable for industrial applications? *Linear motion tips* [online]. 2019 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/are-brushed-motors-suitable-for-industrial-applications/>
- [28] DC Series Motor Working and Its Applications. *Elprocus* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/dc-series-motor-components-circuit-diagram-applications/>
- [29] KARTHIK, Sri Hari. Types of Motors used in Electric Vehicles. *CircuitDigest* [online]. 2019 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev?fbclid=IwAR2ruFOpeKpV46aaT39GVWUT5fQYBWgCuDivrInTi-WcKlt0v0Cipa1f-e0>
- [30] Permanent Magnet Synchronous Motor. *Medium* [online]. 2019 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://medium.com/@theengineeringknowledge/permanent-magnet-synchronous-motor-40c11ab68ccd>
- [31] Three Phase Induction Motor Definition & Working Principle. *Electrical4u* [online]. 2019 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/working-principle-of-three-phase-induction-motor/>
- [32] KHAJEPOUR, Amir, Saber FALLAH a Avesta GOODARZI. *ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES*. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2014, s. 71-95. ISBN 9781118341513
- [33] Understanding micro, mild, full and plug-in hybrid electric vehicles. *X-engineer* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/micro-mild-full-hybrid-electric-vehicle/>
- [34] Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – architectures. *X-engineer* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/micro-mild-full-hybrid-electric-vehicle/>
- [35] CENOVĚ DOSTUPNÝ HYBRID 48V. *Valeo* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://valeo.cz/cs/48v-affordable-hybrid/>
- [36] Electrification: 48 Volt Technologies. *Continental* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Technology-Trends/Electrification/48-Volt-Technologies>
- [37] Our 48-volt mild hybrids: Maximum power in a sleek, flexible package. *Delphi* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Technology-Trends/Electrification/48-Volt-Technologies>

[38] GLON, Ronan. More hybrid cars mean less gas, so Bosch is making them easier to build. *Digital trends* [online]. 2017 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com/cars/bosch-48-volt-hybrid-first-drive/>

Použitá literatura obrázků a tabulek

[39] Energie a její transformace. In: *Utb* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_10.pdf

[40] Elektrická energie. In: *Step* [online]. 2015 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://step.vscht.cz/infografiky/elektricka-energie/>

[41] CHATURVEDI, Niharika. GLOBAL SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE (SMES) SYSTEMS MARKET 2019. In: *INDUSTRY NEWS ENGINE* [online]. 2019 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.industrynewsengine.com/global-superconducting-magnetic-energy-storage-smes-systems-market-2019-industry-analysis-and-forecast-2024/>

[42] BUGÁR, Martin. Superkondenzátory – Technologicky vyspelé zásobníky energie. In: *Posterus* [online]. 2011 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=10736>

[43] Flywheel Energy Storage (FES) Systems Market Outlook and Forecasts 2018 to 2025 and Key Players. In: *OpenPR* [online]. 2018 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.openpr.com/news/1460415/flywheel-energy-storage-fes-systems-market-outlook-and-forecasts-2018-to-2025-and-key-players-active-power-siemens-powerthru-amber-kinetics-beacon-power-boeing-management-calnetix-technologies.html#prid-1460415>

[44] NOVÁK, Jan. Palivové články udrží dron ve vzduchu řadu hodin. In: *Droneweb* [online]. 2018 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/aktuality/item/260-plalivove-clanky-drony>

[45] ŠRUBAŘOVÁ, Petra. Jak fungují palivové články? In: *Tzbinfo* [online]. 2018 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromotory-pohony-a-stroje/16987-jak-funguji-palivove-clanky>

[46] Elektrische auto als middel tegen balans-hoofdpijn. In: *Evconsult* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.evconsult.nl/elektrische-auto-als-middel-tegen-balans-hoofdpijn/>

[47] Lead-acid battery chemistry. In: *Research gate* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Lead-acid-battery-chemistry-a-during-discharging-b-during-charging-and-c-LA_fig4_311305861

[48] Microstructure and Conductivity of ZEBRA Battery Cathode. In: *Slideplayer* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/9326685/>

- [49] Lithium-ion battery chemistry. In: *Research gate* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Lithium-ion-battery-chemistry-a-during-discharging-and-charging-and-b-cylindrical_fig6_311305861
- [50] Tesla switches on world's biggest lithium-ion battery. *Financial times* [online]. 2017 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.ft.com/content/2ca27ee6-d634-11e7-8c9a-d9c0a5c8d5c9>
- [51] LIU, Yisi a Qian SUN. A comprehensive review on recent progress in aluminum-air batteries. In: *Science direct* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S246802571730081X>
- [52] DIOPAN, Václav. Průtokové baterie před prahem singularity. In: *Hybrid.cz* [online]. 2019 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/prutokove-baterie-pred-prahem-singularity-cast-1>
- [53] VREE, Pete. Series DC Motor Connections. *Youtube* [online]. 2016 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=gSCv0rj2uYs>
- [54] Magnetic Motor Components. *Sdm magnetics* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.magnet-sdm.com/magnetic-motor-components/>
- [55] Induction motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor
- [56] LEVKIN, Dmitry. Single-phase induction motor. *Engineeringsolutions* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/induction1ph/>
- [57] GBS 3.2V 40Ah LFMP40AH Single Cell. *Electric motorsport* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.electricmotorsport.com/batteries/lithium/gbs-lifemnp4-3-2v-40ah-lfmp40ah-single-cell.html>
- [58] Clean, Efficient, Light Weight, Powerful BLDC Motor Drive Kits for Electric Car, ATV, Go-Kart, Golf Buggy. *Goldenmotor* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.goldenmotor.com/eCar/frame-eCar.htm>
- [59] BLDC MOTOR MARS 24-48V 5000W. *Eskutr* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://eskutr.cz/motory/986-mars-0907-bldc-motor-24-48v-5000w.html>
- [60] Motenergy ME1117 PMAC Motor, 24-48V, 6 hp cont, 19 hp pk. *Electric motorsport* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motors/brushless-motors/motenergy-me1117-pmac-motor-24-48v-6-hp-cont-19-hp-pk.html>
- [61] Motenergy ME1114 Brushless Motor 24-72V, 5000RPM, 10 kW cont, 24 kW pk. *Electric motorsport* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z:

<https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motors/brushless-motors/me1114-brushless-motor-24-72v-5000rpm-10-kw-cont-24-kw-pk.html>

- [62] DC MĚNIČ 48V NA 12V MAX 300W. *Eskutr* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://esku.cz/menice-napeti-dc-dc-convertors/798-dc-menic-48v-na-12v-max-120w.html>
- [63] High quality YUCOO 50A step down dc dc converter 48v to 12v dc converter. *Alibaba* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/High-quality-YUCOO-50A-step-down_62002530104.html?spm=a2700.7724857.normalList.21.268e3f89oFtriB&s=p&fullFirstScreen=true
- [64] Isolated dc dc converter 48v to 12v 125a 1500w power electronics. *Alibaba* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Isolated-dc-dc-converter-48v-to_62077368717.html?spm=a2700.7724857.normalList.48.268e3f89oFtriB
- [65] High power 85A 1020w dc dc 24 to 12 volt converter for cars. *Alibaba* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/High-power-85A-1020w-dc-dc_60757460242.html?spm=a2700.details.deiletai6.8.3b807fa1DCjM1n
- [66] High Performance Step Down Dc 24v To Dc 12v Converter 60a Converter. *Alibaba* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/High-Performance-Step-Down-Dc-24v_60700799380.html?spm=a2700.7724857.normalList.60.48a769c5fxldQb
- [67] ŘÍDÍČÍ JEDNOTKA KELLY KLS-N SIN WAVE BLDC 30V-72V 160A-380A. *Eskutr* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://esku.cz/regulatory/984-386-ridici-jednotka-kelly-kls-n-sin-wave-bldc-30v-72v-160a-380a.html#/57-maximalni_proud-350a_100a_trvale
- [68] Sevcon Gen4 S2 36/48V 275A AC Motor Controller 634A42203. *Electric motorsport* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/controllers/brushless-motor-controllers/sevcon-gen4-36-48-275.html>
- [69] LISI INSULATING BOLT for Mild Hybrid Electric Vehicle (mHEV). *Lisi automotive* [online]. 2019 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.lisi-automotive.com/en/lisi-insulating-bolt-for-mhev/>

Seznam obrázků

Obrázek 1: <i>Formy a přeměny energií [39]</i>	12
Obrázek 2: <i>Zdroje elektrické energie [40]</i>	12
Obrázek 3: <i>Výroba elektrické energie podle zdroje [2]</i>	13
Obrázek 4: <i>Supravodivý indukční akumulátor [41]</i>	15
Obrázek 5: <i>Superkapacitor [42]</i>	16
Obrázek 6: <i>Setrvačnick [43]</i>	16
Obrázek 7: <i>Palivový článek [44]</i>	18
Obrázek 8: <i>V2G technologie [46]</i>	20
Obrázek 9: <i>Olověný článek [47]</i>	23
Obrázek 10: <i>Nikl-kadmium článek [47]</i>	24
Obrázek 11: <i>Nikl-metal hydrid článek [47]</i>	25
Obrázek 12: <i>Nikl-zinek článek [47]</i>	26
Obrázek 13: <i>Sodík-síra článek [47]</i>	28
Obrázek 14: <i>Sodík-nikl chlorid článek [48]</i>	29
Obrázek 15: <i>Lithium-ion článek [49]</i>	30
Obrázek 16: <i>Lithium-ion akumulátory v Austrálii [50]</i>	31
Obrázek 17: <i>Hliník-vzduch článek [51]</i>	33
Obrázek 18: <i>Redoxní průtokový článek [52]</i>	35
Obrázek 19: <i>Způsoby ukládání energie podle kapacity a doby skladování [20]</i>	35
Obrázek 20: <i>Způsoby ukládání energie podle účinnosti a životnosti [21]</i>	36
Obrázek 21: <i>Způsoby ukládání energie podle energetické a výkonové hustoty [21]</i>	36
Obrázek 22: <i>Nově registrovaná vozidla v EU v roce 2019 podle typu pohonu [23]</i>	39
Obrázek 23: <i>Nově registrovaná hybridní a elektrická vozidla v EU v roce 2019 [23]</i>	40
Obrázek 24: <i>Ideální křivka trakční síly pro rozjezd vozidla a hnací síla SM [24]</i>	40
Obrázek 25: <i>Ideální trakční síla pro rozjezd a dostupná trakční síla rychlostních stupňů [24]</i>	41
Obrázek 26: <i>Ideální trakční síla pro rozjezd a dostupná trakční síla elektromotoru [25]</i>	41
Obrázek 27: <i>Rozdělení elektromotorů [26]</i>	42
Obrázek 28: <i>Sériový DC motor [27]</i>	42
Obrázek 29: <i>Zapojení sériového motoru [53]</i>	43
Obrázek 30: <i>Bezkartáčový DC motor [54]</i>	44
Obrázek 31: <i>Průběh fází v synchronním AC motoru [55]</i>	45
Obrázek 32: <i>Asynchronní třífázový motor [56]</i>	46
Obrázek 33: <i>Sériové zapojení hybridního vozidla [32]</i>	48
Obrázek 34: <i>Paralelní zapojení hybridního vozidla [32]</i>	48
Obrázek 35: <i>Umístění elektromotoru – P0 [34]</i>	51

Obrázek 36: Umístění elektromotoru – P1 [34]	52
Obrázek 37: Umístění elektromotoru – P2 [34]	52
Obrázek 39: Umístění elektromotoru – P4 [34]	53
Obrázek 38: Umístění elektromotoru – P3 [34]	53
Obrázek 40: Přídavný 48 V systém Bosch [34]	56
Obrázek 41: Schéma elektrické sítě vozidla s přídavným hybridním systémem [69]	59
Obrázek 42: Model konvenčního vozidla	63
Obrázek 43: Model MHEV	63
Obrázek 44: Průběh spotřeby paliva konvenčního vozidla a MHEV [g]	64
Obrázek 45: Průběh spotřeby paliva konvenčního vozidla a MHEV [l/100 km]	64
Obrázek 46: Průběh funkce elektromotoru	65
Obrázek 47: Průběh spotřeby energie v baterii	65

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Typy palivových článků [45].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 2: Srovnání článků [11].....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 3: Srovnání funkcí u hybridních vozidel [33]</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 4: Srovnání možností přestavby vozidel [34]</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 5: Srovnání baterií.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 6: Srovnání elektromotorů</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 7: Srovnání DC-DC měničů</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 8: Srovnání řídicích jednotek elektromotoru</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 9: Kalkulace nákladů na přestavbu vozidla</i>	<i>61</i>