



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

HYBRIDNÍ POHON AUTOMOBILŮ

HYBRID VEHICLE PROPULSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MATĚJ SOMMER

VEDOUČÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK KAPLAN, CSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Matěj Sommer
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
Akademický rok:	2017/18

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

Hybridní pohon automobilů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem závěrečné bakalářské práce je komplexní studium problematiky hybridního pohonu osobních automobilů a na základě shromážděných poznatků vytvořit ucelený přehled používaných principů včetně jejich kritického hodnocení.

Cíle bakalářské práce:

Cílem řešení zadání závěrečné bakalářské práce je vytvořit ucelený přehled principů a konstrukčních uspořádání hybridního pohonu osobních automobilů, včetně vlastního kritického hodnocení jednotlivých systémů, zdůraznění jejich předností a nedostatků a odhadu směřování dalšího vývoje v této oblasti.

Seznam doporučené literatury:

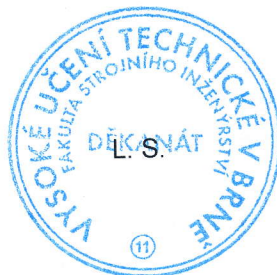
SHIGLEY, Joseph Edward, MISCHKE, Charles R. a BUDYNAS, Richard G. (ed.). Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

BUDYNAS, Richard G., NISBETT, J. Keith a SHIGLEY, Joseph Edward. Shigley's mechanical engineering design. 10th edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015. 1104 s. ISBN 0073398209.

KAMEŠ, Josef. Alternativní pohon automobilů. Praha: BEN-Technická literatura, 2004. 231 s. ISBN 80-7300-127-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 1. 11. 2017



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

V této práci je zpracován ucelený přehled možných principů hybridního pohonu a jsou zdůrazněny přednosti a nedostatky jednotlivých koncepcí, přičemž zvláštní pozornosti je věnováno vozidlům s palivovými články a elektromotorem. Součástí práce je prezentace vlastního názoru na tuto problematiku a odhad dalšího možného vývoje hybridních pohonů a jejich podíl na celkovém trhu s osobními automobily.

Summary

This thesis sums up a comprehensive overview of all possible ways of hybrid propulsion and points out the advantages and disadvantages of each of these designs with special attention to fuel cell vehicles. It includes a presentation of my own opinions regarding this issue and an estimation of future development of hybrid propulsion technologies and their place on the market with personal vehicles.

Klíčová slova

hybrid, palivový článek, rekuperace, emise, vodík, elektromotor, akumulátor, polymerní membrána, Toyota Mirai, HEV, FCV, FCEV, EV, ZEV, PEM, PEMFC

Keywords

hybrid, fuel cell, regenerative braking, emission, hydrogen, electric motor, battery, proton exchange membrane, Toyota Mirai, HEV, FCV, FCEV, EV, ZEV, PEM, PEMFC

SOMMER, M. *Hybridní pohon automobilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 53 s. Vedoucí doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Kaplana, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

Matěj Sommer

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Zdeňku Kaplanovi, CSc. za ochotu, podporu a cenné rady při vytváření této práce.

Matěj Sommer

Obsah

1	Úvod	3
2	Hybridní pohon	4
3	Vybrané koncepce hybridního pohonu	5
3.1	Spalovací motor a elektromotor	5
3.1.1	HEV s paralelním uspořádáním	5
3.1.2	HEV se sériovým uspořádáním	5
3.2	Hybridy využívající setrvačnick	6
3.2.1	Mechanický setrvačnick	6
3.2.2	Elektrický setrvačnick	7
3.3	Hybridy využívající ukládání energie do plynu pod tlakem	8
3.3.1	HHV s paralelním uspořádáním	8
3.3.2	HHV se sériovým uspořádáním	9
3.4	Hybridy s palivovými články	10
3.4.1	Palivový článek a elektromotor	10
3.4.2	Palivový článek a spalovací motor	10
4	Hybridní vozidla s palivovým článkem a elektromotorem	12
4.1	Konstrukce vozidla s palivovými články	12
4.1.1	Princip fungování systému	12
4.1.2	Jednotlivé součásti	14
4.1.3	Rozmístění součástí do prostoru karoserie	17
5	Palivové články	19
5.1	Historie	19
5.2	Základní princip	19
5.3	Účinnost	20
5.3.1	Napětová účinnost	21
5.3.2	Termodynamická účinnost	21
5.4	Typy palivových článků	22
5.4.1	S alkalickým elektrolytem	22
5.4.2	S polymerní membránou	24
5.4.3	S kyselinou fosforečnou	26
5.4.4	S tavenými uhličitany	27
5.4.5	S tuhými oxidy	29
5.4.6	S přímým metanolem	30
5.5	Shrnutí k palivovým článkům	31
6	Vodík	33
6.1	Získávání vodíku tradičními způsoby	33
6.2	Získávání vodíku alternativními způsoby	33
6.3	Ukládání vodíku	35
6.4	Distribuce vodíku	35
6.4.1	Centralizovaná výroba a převoz v nádržích	36

OBSAH

6.4.2	Výroba v místě odběru	36
6.4.3	Centralizovaná výroba a potrubní doprava	36
6.4.4	Aktuální stav	36
7	Ekonomie provozu vozidel s palivovým článkem	38
7.0.1	Porovnání s elektromobily	38
7.0.2	Shrnutí	39
8	Vlastní zhodnocení	42
9	Závěr	44
10	Seznam použitých zkratk a symbolů	52

1. Úvod

V první polovině minulého století se v našich podmínkách prosadil spalovací motor jako hlavní způsob pohonu v osobní přepravě a svoji pozici si drží dodnes. V jeho začátcích mu v konkurenčním boji proti parnímu motoru pomohla jednoduchost obsluhy a proti elektromotoru jeho vyšší dojezd.

V posledních letech se však čím dál častěji o další existenci spalovacího motoru diskutuje. Důvodem těchto diskuzí jsou hlavně obavy o schopnosti motorů plnit stále přísnější emisní normy vztahující se na nová vozidla. Automobilky se tedy snaží vytvořit co nejefektivnější motor s nízkými emisemi. Mezi neznámější způsoby patří například přeplňování motorů, snižování zdvihového objemu, či použití CVT převodovek. Účinnost spalovacích motorů má však své limity dané možnostmi technologie výroby a výslednou cenou motoru. Je tedy pouze otázkou času, kdy přestanou spalovací motory emisním normám vyhovovat. Kromě tlaku ze strany států je na vývoj motorů vyvíjen také tlak ze strany zákazníků. Konstrukce motorů je totiž s přibývajícím systémy, které mají za úkol snižovat emise, stále složitější a tudíž nákladnější. Potřebu nalézt výhodnější pohon navíc podporuje růst cen benzínu a nafty.

Toto prostředí umožňuje stále větší prosazování alternativních pohonů, jako jsou například spalovací motory na etanol, zemní plyn, či LPG, dále elektromotory nebo hybridní pohony. Směrů, kterými by se v budoucnu mohl ubírat vývoj pohonů, je tedy více. Dosaďadní vývoj trhu naznačuje, že by mělo jít o hybridní vozy s elektromotorem nebo o čisté elektromobily. Vytlačení stávajících modelů se spalovacími motory z nabídky automobilek je však nevyhnutelné.

2. Hybridní pohon

Hybridní pohon je spojení dvou a více forem pohonu způsobem, který co nejvýhodněji kombinuje pozitivní vlastnosti a potlačuje negativní vlastnosti daných pohonů.

Typickým příkladem je sériové uspořádání elektromotoru a spalovacího motoru (kapitola 3.1.2). Kola automobilu jsou zde poháněná elektromotorem, který má sám o sobě některé nevýhody. Za tu největší se považuje jeho malá energetická hustota, resp. malá energetická hustota akumulátorů, ze kterých čerpá energii. Tato nevýhoda se však při jeho použití po boku spalovacího motoru smazává, jelikož energii pro elektromotor zde produkuje spalovací motor, který má energetickou hustotu mnohem větší. Velkou nevýhodou spalovacího motoru však je, že nejvyšší účinnosti dosahuje až při plném zatížení. V automobilech klasické koncepce při takových podmínkách pracuje jen minimálně a jeho výsledná účinnost se tím snižuje. Při použití v sériovém uspořádání se však spalovací motor provozuje právě pouze při maximálním zatížení, a to pouze ve chvílích, kdy je potřeba do systému doplňovat elektrickou energii. Hlavní myšlenkou sériového uspořádání je vytvoření vozidla, které má větší dojezd než elektromobil a větší účinnost než klasický vůz se spalovacím motorem.

Velmi významnou součástí hybridních pohonů je také rekuperace kinetické energie. Při rekuperaci se energie vzniklá brzděním ukládá do zásoby, na rozdíl od klasických brzd, kdy se brzdí energie přeměňuje na odpadní teplo. Rekuperace kinetické energie lze dosáhnout různými způsoby.

Při kombinování více pohonů často dochází k několikanásobným přeměnám energie, při kterých vznikají energetické ztráty. Například v případě vozidla s palivovým článkem (kapitola 3.4.1) se nejprve přemění chemická energie ve vodíku na chemickou energii v akumulátoru, která se nakonec pomocí elektromotoru mění na energii mechanickou. Při rekuperaci se mění mechanická energie zpět na chemickou energii uloženou v akumulátoru. Všechny tyto přeměny jsou spojené s určitými ztrátami, které ovlivňují celkovou účinnost systému.

Existuje mnoho kombinací pohonů a jejich vzájemného spojení, ale za nejznámější koncepci je považováno spojení elektromotoru a spalovacího motoru. Za první hybridní automobil tohoto typu (a hybridní automobil vůbec) je považován vůz Lohner-Porsche, představený na Pařížském autosalonu v roce 1900. Po tomto díle konstruktéra Ferdinada Porsche následovaly další hybridní automobily, které byly z dnešního pohledu vyráběné ve velmi malých sériích. K velké změně vnímání hybridních automobilů došlo až po roce 1997, kdy byl na trh uveden první sériově vyráběný hybrid Toyota Prius následovaný v roce 1999 Hondou Insight. Největší podíl na trhu hybridních vozů dodnes patří těmto dvěma automobilkám, a koncepce kombinace elektromotoru se spalovacím motorem je tedy nejúspěšnější.

Kromě této koncepce však existují i další zajímavé a do budoucna nadějně systémy, z nichž se některé obejdou bez spalovacího motoru, což by mohlo představovat velkou výhodu v podobě nižších emisí.

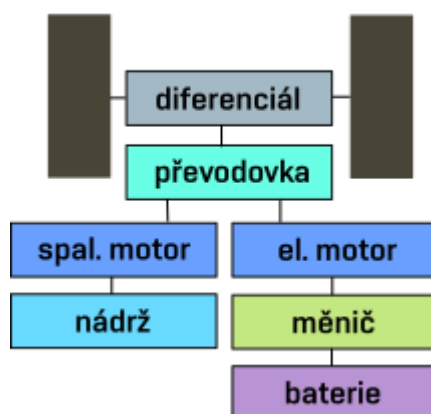
3. Vybrané koncepce hybridního pohonu

3.1. Spalovací motor a elektromotor

„Hybrid Electric Vehicle“ (HEV) už v této práci byly několikrát zmíněny. Podle uspořádání lze rozdělit do dvou hlavních skupin.

3.1.1. HEV s paralelním uspořádáním

V tomto uspořádání je spalovací motor společně s elektromotorem napojen na vstupní hřídel do převodovky, která může být automatická i manuální. Systém funguje v několika režimech podle aktuální potřeby. Při akceleraci fungují současně oba motory pro maximální výkon a využití baterie. Při udržování stálé rychlosti funguje pouze spalovací motor a v případě přebytku energie uložené v baterii se připojí i elektrický motor. Při brzdění se vypne zapalování a vstřikování a zavřou se ventily spalovacího motoru, aby působil co nejmenším odporem. Elektromotor přejde do režimu generátoru a svým odporem brzdí automobil. Po úplném zastavení zůstanou oba motory stát. Mezi elektromotorem a baterií musí být zařazen měnič napětí, protože elektromotor potřebuje k chodu vyšší napětí, než je baterie schopná poskytnout.



Obrázek 3.1: Schéma HEV s paralelním uspořádáním

Na uvedeném principu funguje například technologie IMA (Intelligent Motor Assist) používaný v hybridech Honda. Pokročilejší systémy, např. Toyota Prius nebo Chevrolet Volt mají automatickou převodovku s možností úplného odpojení spalovacího motoru. Zde se hovoří o tzv. paralelně-sériovém uspořádání.

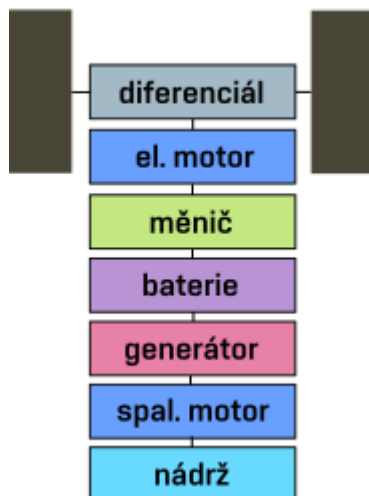
Tato technologie umožňuje snížení spotřeby paliva v městské dopravě, kdy se při častém brzdění využívá rekuperace energie. V dálničním provozu však dosahuje spotřeba těchto hybridů podobných hodnot jako u obyčejných aut.

3.1.2. HEV se sériovým uspořádáním

Zatímco paralelní uspořádání lze zjednodušeně chápat jako rozšíření pro klasickou koncepci vozu se spalovacím motorem, sériové uspořádání má blíže k elektromobilu. Spalovací

3.2. HYBRIDY VYUŽÍVAJÍCÍ SETRVAČNÍK

motor má v tomto případě pouze funkci generátoru elektrické energie pro elektromotor a nepohání tedy kola přímo.



Obrázek 3.2: Schéma HEV se sériovým uspořádáním

Hlavní myšlenka sériového uspořádání byla vysvětlena již v kapitole 2. Spalovací motor je udržován v co nejvyšším zatížení, kdy je jeho činnost nejefektivnější. Motor se přitom zapíná, pouze když je potřeba dobíjení baterie, a funguje jako tzv. „range-extender“. Zástupcem této kategorie může být například BMW i3, které je doslova elektromobilem s příplatkovým dvouválcovým motorem.

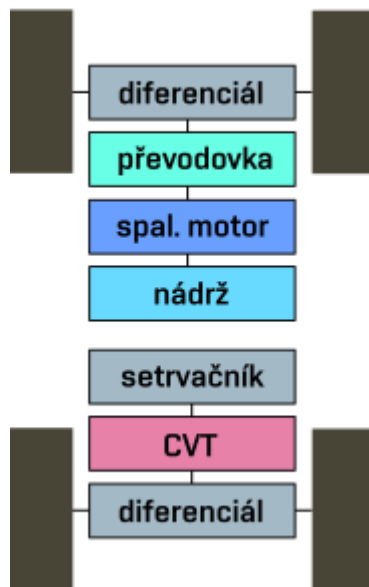
3.2. Hybridy využívající setrvačnick

3.2.1. Mechanický setrvačnick

Zajímavým sekundárním pohonem může být také setrvačnick. Výzkum možností takového pohonu prováděla automobilka Volvo v roce 2012 na modelu S60 T5 ve spolupráci s Flybrid Automotive, britským specialistou na podobné systémy [1].

U testovaného vozu zůstal spalovací motor a vše pod kapotou beze změn proti produkčnímu modelu. Samotný systém rekuperace kinetické energie (KERS) je připojen na zadní nápravu, která původně nebyla poháněná. Při brzdění se pomocí variátorové převodovky plynule spojí zadní kola se setrvačnickem, čímž se setrvačnick roztáčí a vozidlo zpomaluje. Energie uložená v setrvačnicku se později využije při opačném procesu, kdy se setrvačnick zpomaluje a auto zrychluje. Samozřejmostí je vypínání motoru při ustálené rychlosti, brzdění a zastavení. Tato koncepce by se dala označit za paralelní uspořádání, i když se proti paralelnímu uspořádání v HEV a HHV liší. Na rozdíl od těchto systémů je zde primární a sekundární pohon spojen pouze vozovkou.

Pro připojení tohoto systému není potřeba velkých zásahů do konstrukce vozidla díky jeho malé prostorové náročnosti a nezávislosti na primárním pohonu. Tato výhoda je bohužel také jednou z nevýhod. Zadní kola se totiž podílí na celkové brzděné práci menší měrou než kola přední a množství rekuperované energie je tím omezené. Tento problém by bylo možné vyřešit paralelním uspořádáním systému, ve stejném stylu jako je tomu u HEV.

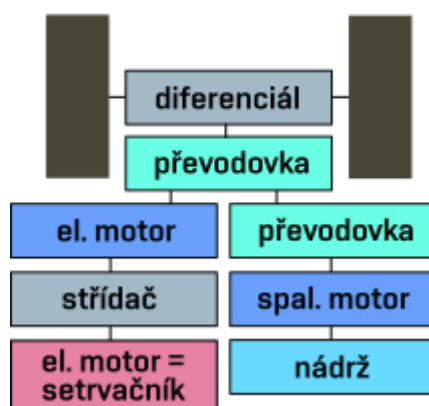


Obrázek 3.3: Schéma hybridu s mechanickým setrvačником

3.2.2. Elektrický setrvačnik

S vlastním řešením rekuperace brzděné energie přišla také firma GKN sídlící v Anglii. Jejich verze hybridu se setrvačником využívá místo běžného setrvačniku připojeného k převodovce takový typ setrvačniku, který zároveň funguje jako elektromotor, a do systému není zapojený mechanicky, ale elektronicky [2].

Pro implementaci tohoto systému do existujících vozidel se spalovacími motory není potřeba větších zásahů do původní konstrukce. Mezi převodovku a diferenciál je pouze zařazena druhá převodovka, k níž je připojen elektromotor. Tento elektromotor je kabely spojen se střídačem a setrvačником, které tedy mohou být umístěny v libovolném místě karoserie. Při brzdění funguje trakční elektrický motor jako generátor a vzniklou elektrickou energií se roztáčí elektrický setrvačnik. Při potřebě zrychlování funguje celý systém naopak. Setrvačnik vyrábí elektrickou energii pro trakční motor, čímž se zpomaluje a vyčerpává tím svoji potenciální energii. Při akceleraci je navíc aktivní i spalovací motor.



Obrázek 3.4: Schéma hybridu s elektrickým setrvačником

3.3. HYBRIDY VYUŽÍVAJÍCÍ UKLÁDÁNÍ ENERGIE DO PLYNU POD TLAKEM

Stejně jako u hybridu s klasickým setrvačником se i zde jedná téměř o plug-and-play řešení, a navíc odpadá nutnost zapojení druhé převodovky. Celý systém váží méně a zabírá méně místa než dnešní hybridy s elektrickou baterií. Nevýhodou však může být omezená účinnost systému kvůli několikanásobné přeměně energie a zůstává také nevýhoda spojená s rekuperací energie ze zadní nápravy, která se na brzdění podílí menší měrou než přední náprava.

3.3. Hybridy využívající ukládání energie do plynu pod tlakem

3.3.1. HHV s paralelním uspořádáním

Tzv. „hydraulic hybrid vehicle“ (HHV) v paralelním uspořádání má svojí stavbou velmi blízko k hybridu s elektrickým motorem v paralelním uspořádání. Jediným rozdílem je nahrazení větve s elektrickým motorem, měničem napětí a baterií za hydromotor a dvě nádrže. V první nádrži se nachází vak se stlačeným vzduchem, který slouží jako zásobník energie. Tento vak je obklopen hydraulickým olejem, který přenáší tlak uskladněného vzduchu na hydromotor a tím ho pohání. Po průchodu hydraulického oleje přes hydromotor olej ztrácí tlak a ukládá se do druhé nádrže. Při opačném chodu hydromotoru, kdy funguje jako pumpa a brzdí automobil, dochází k opačnému jevu a olej se vrací do první nádrže, kde tlačí na vak se vzduchem. Při tomto procesu se přeměňuje kinetická energie vozidla zpět na potenciální energii stačeného vzduchu a tím dochází k rekuperaci energie.



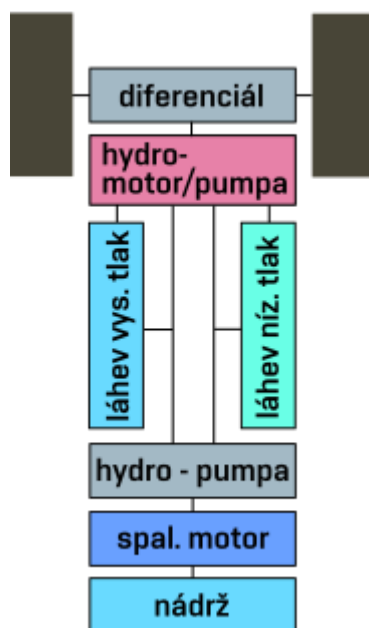
Obrázek 3.5: Schéma HHV s paralelním uspořádáním

Toto řešení funguje v konceptu „Hybrid Air“ od koncernu PSA z roku 2013 [3]. Systém se přizpůsobuje aktuálnímu stylu jízdy pomocí tří režimů. V režimu Air, který je aktivní do rychlosti 70km/h, je spalovací motor vypnutý a vozidlo je poháněno pouze pomocí hydromotoru. Při udržování vyšší konstantní rychlosti je aktivní režim Spalovací motor, kdy je spalovací motor zapnutý neustále a jeho nadbytečný výkon je využíván k doplňování energie. Kombinovaný režim, při kterém pracují oba motory souběžně, se aktivuje při potřebě vyššího výkonu.

HHV se sériovým uspořádáním mají stejné výhody jako HEV, ale navíc slibují úsporu váhy celého systému a stejně tak snížení jeho ceny. Hlavním důvodem je záměna baterií za tlakovou nádrž. Koncern PSA plánoval sériovou výrobu těchto vozidel, ale projekt narazil na legislativní problémy a nezáměr investorů [4].

3.3.2. HHV se sériovým uspořádáním

Stejně jako HEV lze HHV sestavit v sériovém uspořádání hydromotoru a spalovacího motoru. Spalovací motor je zde napojen na hydraulickou pumpu, a nelze jím tedy pohánět kola přímo. Ta jsou poháněna pouze hydromotorem. Opět tu jsou dvě nádrže, z nichž jedna uchovává vak se stlačeným vzduchem, obklopený hydraulickým olejem, a druhá jen olej pod nízkým tlakem.



Obrázek 3.6: Schéma HHV se sériovým uspořádáním

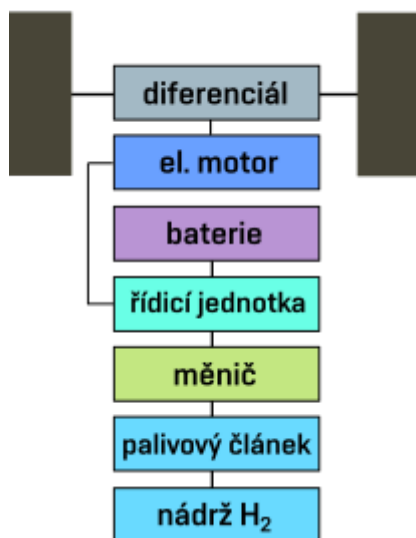
Celý systém má velmi jednoduchý princip. Při zrychlování putuje olej z nádrže pod tlakem do hydromotoru, který svým tlakem roztáčí. Po průchodu hydromotorem svůj tlak ztratí a pokračuje do nádrže pod nízkým tlakem. Při zpomalování se z hydromotoru stává hydraulická pumpa, která nabírá olej z nízkotlaké nádrže a tlačí ho do vysokotlaké nádrže, kde olej stlačuje vak se vzduchem, a brzdná energie se tedy ukládá zpět do zásoby. Pokud je v nádrži se stlačeným vzduchem nedostatečný tlak, zapíná se spalovací motor připojený na druhou hydraulickou pumpu a přečerpáváním oleje do vysokotlaké nádrže doplňuje zásobu potenciální energie stlačeného vzduchu.

Výhodou systému je možnost využití spalovacího motoru v podmínkách, kdy dosahuje nejlepší účinnosti. To znamená při maximálním vytížení a v otáčkách, kdy pracuje neefektivněji. Navíc ve srovnání s HEV není tento systém tak těžký a nákladný na výrobu díky absenci akumulátorů, což platí také pro HHV s paralelním uspořádáním. Zástupcem této technologie jsou dovožkové vozy společnosti UPS, které tato společnost zařadila do své flotily v roce 2012 [5].

3.4. Hybridy s palivovými články

3.4.1. Palivový článek a elektromotor

Další slibnou technologií, která by mohla v budoucnu nahradit spalovací motory, jsou palivové články. Jsou to zařízení, ve kterých za přímé reakce paliva a okysličovadla vzniká elektrický proud. Nejčastěji bývá daným palivem vodík, ale existují i články spalující jiná paliva. Funkce palivového článku je podrobně vysvětlena v kapitole 5.2. Vozidla využívající palivové články se v anglické literatuře nazývají „fuel cell vehicles (FCV)“.



Obrázek 3.7: Schéma hybridu s palivovým článkem a elektromotorem

Zásobník vodíku s palivovým článkem může vedle elektrické baterie fungovat jako sekundární zdroj energie. Uspořádání je podobné elektromobilu, k baterii je však navíc připojen PČ a nádrž s palivem. Z povahy PČ vyplývá, že je aktivní kdykoliv, když dochází k odběru proudu na jeho elektrodách, a doplňování energie do baterie je tedy možné kdykoliv po dobu jízdy. Při brzdění funguje elektromotor jako generátor, čímž dobíjí baterii a svým odporem zpomaluje vozidlo. Dochází tak k rekuperaci brzděné energie.

Na tomto principu funguje například Toyota Mirai, kterých se od počátku výroby v roce 2015 do prosince 2017 prodalo 5300 kusů, nebo Honda FCX Clarity [6]. Hlavní výhodou těchto vozidel je jejich bezemisní provoz. Jediným odpadním produktem tohoto systému je totiž obyčejná voda. Nevýhodou může být vysoká cena materiálů potřebných k výrobě palivového článku (vzácné kovy) a také nedostatečně vyvinutá síť stanic, kde by bylo možné vodík odebírat pod potřebným tlakem.

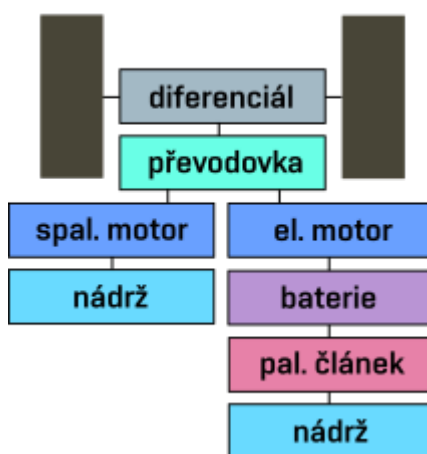
3.4.2. Palivový článek a spalovací motor

Posledním typem hybridního systému, který bude v této kapitole prezentovaný, je kombinace palivového článku se spalovacím motorem.

O jakémkoliv fungujícím exempláři s touto koncepcí se mi nepodařilo najít žádné informace. Existuje však myšlenka, že by tato koncepce mohla být výhodnější, než klasické automobily se spalovacími motory či FCV. Samotný palivový článek dosahuje vyšší účinnosti než spalovací motor, ale v případě použití paliva ve formě stlačeného vodíku

3. VYBRANÉ KONCEPCE HYBRIDNÍHO POHONU

má systém nízkou energetickou hustotu a infrastruktura pro doplňování vodíku vyžaduje velké náklady na provoz. Řešením by mohlo být použití reformátoru na palubě vozidla, což by umožňovalo produkovat vodík z nějakého kapalného uhlovodíku (metanol, etanol), a tím by se obě tyto nevýhody smazávaly. Reformátory však dosahují vysoké účinnosti a rychlosti přeměny až při vyšších teplotách. O dodávání tepla by se v tomto systému staral právě spalovací motor, pro který je teplo odpadním produktem. Hlavní výhoda kombinace palivového článku a spalovacího motoru však vychází z charakteristiky průběhu účinnosti těchto pohonů v závislosti na zatížení. Zatímco u spalovacího motoru účinnost při vyšším zatížení roste, u palivového článku je to přesně naopak, jelikož nejvyšší účinnosti dosahuje při malém zatížení. Při vhodném provozním režimu by bylo možné tyto vlastnosti využít a výsledná účinnost systému by nemusela být tolik závislá na zatížení.



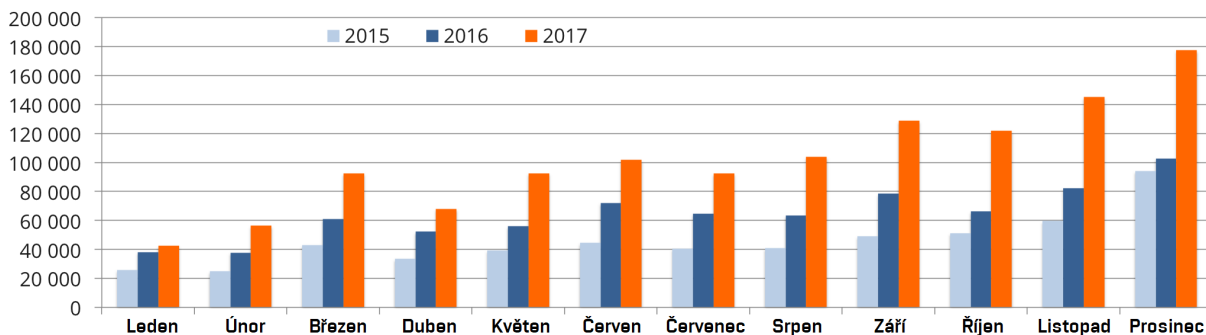
Obrázek 3.8: Schéma hybridu s palivovým článkem a spalovacím motorem

Není těžké si domyslet, proč o této koncepci není příliš zmínek. Už jen samotný palivový článek je velmi drahá technologie, jejíž budoucnost pro komerční využití není jistá. Jenže v tomto systému je navíc také reformátor, který je díky katalyzátorům na bázi vzácných kovů také velmi drahý, a v neposlední řadě je třeba počítat také s cenou spalovacího motoru a velkého množství nezbytného příslušenství. Mezi nevýhodami je nutno zmínit také vznikající emise při přeměně uhlovodíkových paliv na vodík.

4. Hybridní vozidla s palivovým článkem a elektromotorem

Jak už bylo zmíněno v první kapitole, současný vývoj trhu naznačuje, že by spalovací motory mohly být nahrazeny vozy HEV a čistými elektromobily. Jejich podíl na trhu se každoročně zvyšuje a například v Číně již dosáhl na bezmála 4% ze všech prodaných automobilů [7].

Rychlejšímu nástupu těchto vozidel brání jejich vysoké ceny a slabá infrastruktura dobíjecích stanic. Natankování klasického automobilu trvá okolo 2 minut, což je mnohem rychlejší, než dobítí baterií u HEV, či EV. Například TESLA slibuje dobítí baterií u svých modelů za 30 minut. Při aplikaci současného modelu tankování pohonných hmot na dobíjení baterií bychom tedy museli vystavět několikanásobně více dobíjecích stanic, než je dnes stojanů na čerpacích stanicích. Výstavba tolika dobíjecích stanic by se navíc neobešla bez adekvátního posílení přenosové soustavy.



Obrázek 4.1: Celosvětové prodeje plug-in vozidel (EV + PHEV) [8]

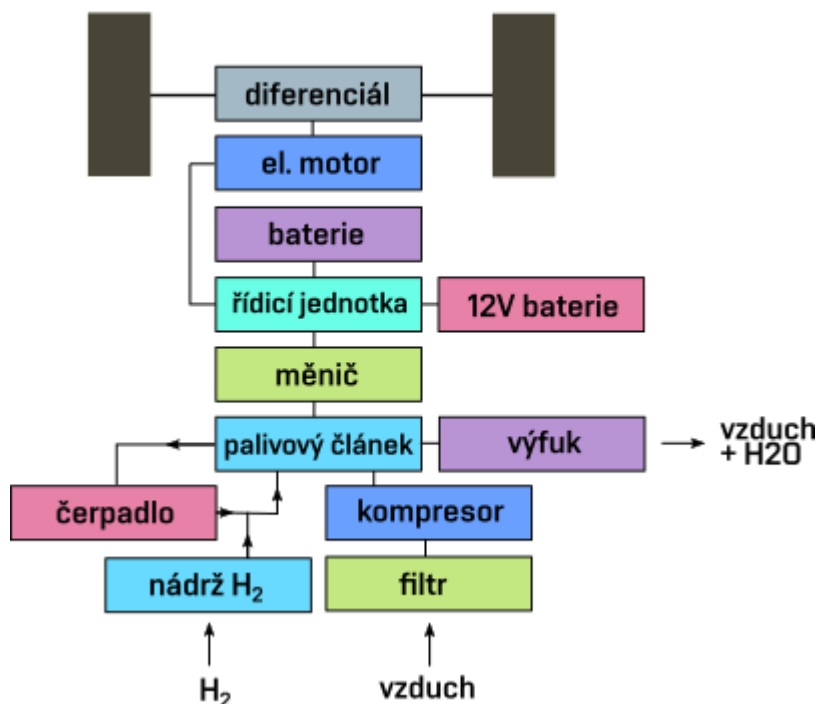
EV a HEV tedy právě teď zažívají suverénní vzestup. Na druhou stranu však stále existuje mnoho překážek, se kterými se budou muset automobilky vypořádat, než dojde k ovládnutí trhu elektromobily a plug-in hybridy. Dalo by se tedy říci, že stále existuje nějaký prostor pro prosazení jiné koncepce. Hledanou jinou koncepcí by mohla být již zmiňovaná vozidla s palivovými články.

4.1. Konstrukce vozidla s palivovými články

Základní princip vozidla s nádrží na vodík byl stručně vysvětlen v kapitole 3.4.1. Dalo by se říci, že odpovídal popisu systému, který lze nalézt v Toyotě Mirai, a stejný přístup bude tato práce ctít i nadále. Ostatní moderní systémy FCV se totiž svojí stavbou navzájem příliš neliší.

4.1.1. Princip fungování systému

V této kapitole bude princip FCV vysvětlen o trochu podrobněji. Hodilo by se začít u samotného palivového článku, který je srdcem celého systému.



Obrázek 4.2: Schéma FCV

Palivový článek

Jeho stavba a reakce v něm probíhající jsou vysvětleny v kapitole 5.2. Zbývá ještě vysvětlit, jakým způsobem probíhá v FCV plnění reakčními látkami a odvod vedlejších produktů vnitřních reakcí. Oxidačním činidlem ve článku je kyslík, který je přiváděn z atmosféry jako součást vzduchu. Nejprve však musí být zbaven prachových částic pomocí filtru a před vstupem do článku stlačen pomocí kompresoru. Zbytkový vzduch opouští prostor palivového článku společně s vodou, která je produktem vnitřních reakcí. Ta je v tu chvíli ve formě páry, avšak při průchodu výfukem se její část vysráží na stěnách trubek a v jejich ohybech se může hromadit. Takto nahromaděnou vodu je třeba vyhánět pomocí kompresoru, který se spíná buď automaticky při naplnění výfuku, či manuálně, například před vypnutím vozidla. Vodík je do článku přiváděn přímo z vysokotlakých nádrží. Po průchodu článkem je třeba zbytkový vodík znovu stlačit a vrátit do oběhu pro jeho další využití. To má na starosti oběhové čerpadlo (obr. 5.6).

Úprava elektrického proudu

Vyrobenou elektrickou energii je nutno před dalším využitím upravit podle potřeby elektromotoru. Ke zvýšení napětí slouží měnič napětí propojující palivový článek s řídicí jednotkou. Ta plní v tomto systému více funkcí. Elektrickou energii přijatou z měniče ukládá buď do hlavního akumulátoru, nebo do klasické 12V baterie, která zde slouží, stejně u jako u všech ostatních vozidel k napájení menších spotřebičů. Pokud vozidlo používá motor na střídavý proud, má v sobě řídicí jednotka zabudovaný také střídač, který před vstupem proudu do motoru mění stejnosměrný proud z baterie, či přímo z měniče na střídavý proud o určité frekvenci. Navíc má řídicí jednotka za úkol, jak už z názvu vypovídá, řídit celý proces přeměny chemické energie na elektrickou a její dodávání na motor tak, aby byl celý proces co nejefektivnější.

4.1. KONSTRUKCE VOZIDLA S PALIVOVÝMI ČLÁNKY

Přeměna elektrické energie na energii mechanickou

Po průchodu proudu řídicí jednotkou jej stačí dodat do elektromotoru a jeho výkon následně přenést diferenciálem na poháněná kola. Diferenciál zároveň plní také funkci jednoduché převodovky se stálým převodovým poměrem.

4.1.2. Jednotlivé součásti

V této kapitole bude věnován prostor několika součástem systému FCV, jejichž funkce v systému FCV nebyla dostatečně shrnuta v předchozích kapitolách.

Akumulátor

Akumulátory vozidel s palivovými články se od baterií elektromobilů liší jen minimálně. Jediným velkým rozdílem je jejich kapacita a od toho se odvíjející velikost. Na rozdíl od EV totiž není akumulátor u FCV hlavním zdrojem energie. Podobně jako u palivových článků existuje také u baterií více typů. Také fungují na principu galvanického článku a rovněž se navzájem liší použitými materiály elektrod a elektrolytu. V současné době jsou nejpoužívanějšími typy baterií v EV, HEV i FCV nikl-metal hydridové akumulátory (NiMH) a lithium-iontové akumulátory (Li-ion).

NiMH je jeden z aktuálně nejpoužívanějších akumulátorů a jako úložiště energie pro pohon moderních vozidel se používá nejdéle. Jedna z elektrod je tvořena kovovou slitinou, nejčastěji niklu (Ni), kobaltu (Co) a manganu (Mn). Druhá elektroda je vyrobená z hydroxidu niklitého (NiO(OH)) a jako elektrolyt je použitý vodný roztok hydroxidu draselného (KOH) [9]. Díky použití relativně laciných látek je možné NiMH akumulátory vyrábět za přijatelnou cenu, což je jedna z jejich hlavních výhod oproti Li-ion technologii. Navíc je možné je jednoduše recyklovat, přičemž je jejich recyklace finančně výhodná díky niklu, který obsahují. NiMH akumulátory jsou v dnešní době z EV, HEV a FCV vytlačovány Li-on akumulátory, které mají vyšší energetickou hustotu. Této technologii se zatím drží Toyota, která NiMH akumulátory nabízí v modelu Mirai a v základní verzi modelu Prius, kde je však možné ve vyšších výbavových stupních vůz vybavit Li-on akumulátorem.

U Li-ion baterií je pro výrobu anody použitý uhlík, pro katodu oxid kovu a elektrolytem je lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Právě lithium stojí za jejich největší nevýhodou, kterou je cena. Mezi další nevýhody patří stárnutí, kdy se časem snižuje kapacita akumulátoru. Dále také citlivost na úplné vybití, kdy je obtížné baterii „oživit“ nebo naopak nabití na příliš velkou kapacitu, kdy hrozí vznícení a dokonce výbuch. Na druhou stranu mají vyšší energetickou hustotu než NiMH a netrpí na paměťový efekt. Právě díky velké energetické hustotě jsou dnes nejpoužívanějšími akumulátory pro EV, HEV a FCV. Ve většině případů se jedná konkrétně o typ Li-ion baterií nikl-mangan-kobalt (NMC, či LiNiMnCoO₂). Prvním elektromobilem vybaveným Li-ion akumulátorem byl Tesla Roadster 2008 [10], přičemž další elektromobily Tesla a také Nissan LEAF již od začátku své produkce používaly podobnou technologii. NiMH baterie v HEV nahradila technologií Li-ion v roce 2011 Honda a od roku 2015 je možné pořídit s Li-ion bateriemi také Toyotu Prius. Li-ion akumulátory používá také FCV Honda Clarity a Hyundai ix35.

Elektromotor

Vývoj elektromotorů pro FCV úzce souvisí s vývojem motorů pro EV a HEV. Jsou na ně totiž kladené podobné požadavky, a leckdy je dokonce mezi sebou sdílí. Například Honda Clarity používá totožný motor ve verzi FCV i EV a Toyota Mirai používá motor z hybridního SUV Lexus RX 450h. Motory musí mít vysokou účinnost, velkou výkonovou hustotu, nízkou cenu a musí být schopné při brzdění fungovat jako generátor. V minulosti se pro pohon automobilů používaly různé typy elektromotorů, ale časem se jako nejvýhodnější osvědčily synchronní a asynchronní motory na střídavý proud.

Rotor synchronního motoru na střídavý proud se otáčí stejnou rychlostí jako točivé pole jeho statoru, přičemž při zvýšení zatížení nedochází ke snížení jeho otáček a pouze se vytvoří fázové zpoždění. Při dodávání proudu o konstantní frekvenci si drží konstantní otáčky, a z toho důvodu je při použití pro pohon automobilů nutné použít frekvenční měnič. V anglické literatuře se nazývají „permanent magnet synchronous motor (PMSM)“. V současné době jde o nejrozšířenější typ elektromotorů pro vozidla a kromě FCV Honda Clarity a Toyota Mirai jsou jimi vybaveny také elektromobily Nissan Leaf nebo BMW i3 a hybridy Toyota Prius nebo Chevrolet Volt. Jejich největší slabinou je vysoká cena permanentních magnetů, které jsou potřeba k výrobě rotoru. Oproti asynchronním motorům většinou vykazují vyšší účinnost [11].

Asynchronní motor má podobnou stavbu jako motor synchronní. Síla roztáčející rotor vzniká díky elektromagnetické indukci, a proto je často označován jako motor indukční. Krouticí moment na hřídeli vzniká až při vytvoření skluzu mezi rychlostí otáčení magnetického pole statoru a otáčkami rotoru. Čím větší je tento skluz, tím větší je síla působící na rotor a tím vyšší je výstupní moment. Tímto se asynchronní motory liší od synchronních. Pokud jsou otáčky rotoru naopak vyšší než rychlost otáčení magnetického pole, přechází motor do generátorického režimu a začíná elektřinu do obvodu dodávat. Stejně jako u synchronních motorů je nutné rychlost asynchronních motorů regulovat pomocí frekvenčních měničů. Oproti synchronním motorům jsou levnější na výrobu díky absenci permanentních magnetů, místo kterých jsou zde použity elektromagnety. Cenový rozdíl však není příliš vysoký z důvodu nákladné výroby odlévaného statoru z mědi, který je v konstrukci asynchronních motorů využíván. Navíc oproti synchronním motorům mají větší sklony k přehřívání a jejich tepelné ztráty snižují účinnost. Nejznámějšími vozidly s tímto typem motoru jsou bezesporu vozy Tesla, konkrétně modely S a X. Co se týče FCV, asynchronní motor používá Hyundai ix35 FCV.

Aktuálně se největší pozornosti těší technologie reluktančních spínaných motorů. Jde o typ krokového motoru, kde je elektrická energie dodávaná na vinutí statoru. Největší výzvou při navrhování těchto motorů je vymyslet přepínací systém, kterým se střídavě posílá proud právě na jednotlivé cívky statoru. Díky tomu, že se energie nemusí dodávat na pohyblivou část, se však značně zjednodušuje konstrukce motoru. Pro výrobu rotoru se používají feromagnetika, nejčastěji železo [12]. Oproti synchronním motorům jsou reluktanční motory levnější na výrobu a zároveň mají větší účinnost než motory asynchronní. Navíc mají pro pohon automobilů dostatečnou výkonovou hustotu. Hlavním důvodem, proč se donedávna s tímto typem motoru v automobilech nepočítalo, je jeho sklon dodávat v rámci jedné otáčky nestálý výkon, což se zejména v nižších otáčkách projevuje cukáním. Tento problém se však díky přesným moderním systémům kontroly a řízení chodu motoru podařilo vyřešit a vše nasvědčuje tomu, že by mohl pohon EV, HEV i

4.1. KONSTRUKCE VOZIDLA S PALIVOVÝMI ČLÁNKY

FCV v následujících letech přejít na reluktanční elektromotory. Tento typ motoru již teď používá nový elektromobil Tesla Model 3.

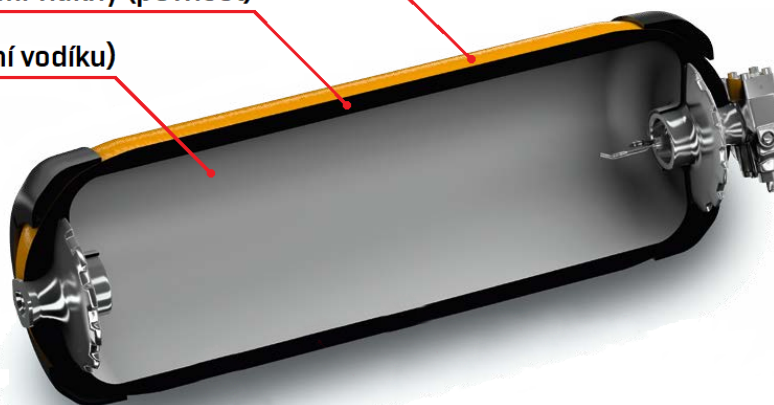
Zásobníky na vodík

Další klíčovou součástí systému FCV je tlaková nádrž na vodík. Jednou z jejích hlavních vlastností je kapacita, která se odvíjí od objemu nádrže a tlaku, při kterém je schopna vodík uchovávat. Ještě důležitější je však bezpečnost jejího provozu. Konstrukce nádrže musí splňovat požadavky normy ISO/TS 15869, která mimo jiné stanovuje kritický tlak, při kterém nádrž může prasknout v závislosti na pracovním tlaku a za jakých podmínek probíhá test propustnosti nádrže, odolnosti vůči cyklickému zatěžování, vůči otevřenému ohni a také test palbou ze střelné zbraně [13]. Moderní nádrže IV. typu jsou schopné udržet vodík pod tlakem až 700 barů. Ve všech aktuálně prodávaných FCV je použita dvojice nádrží a například v Toyotě Mirai mají dohromady objem 122 l, což umožňuje uložení až 5 kg stlačeného vodíku.

Plast vyztužený skelnými vlákny (ochrana povrchu)

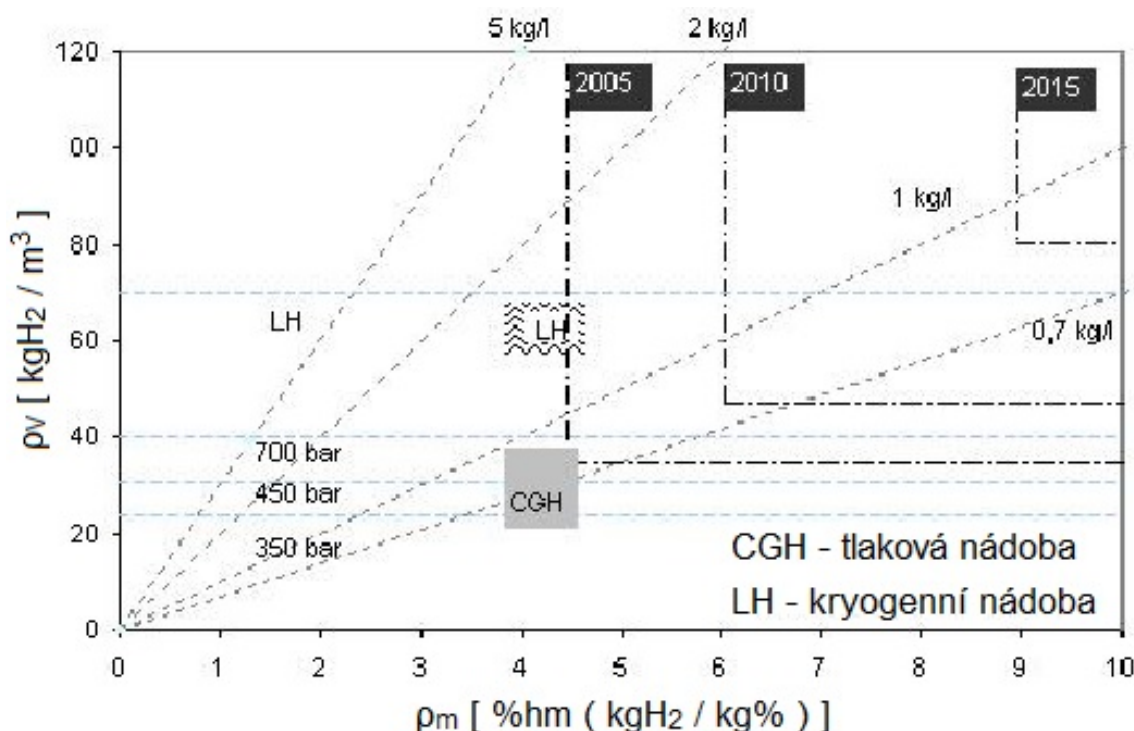
Plast vyztužený uhlíkovými vlákny (pevnost)

Plastový potah (utěsnění vodíku)



Obrázek 4.3: Konstrukce kompozitové nádrže na stlačený vodík [14]

Kromě tlakových nádrží, kde je vodík skladován v plynné formě, lze vodík skladovat také v kapalně formě. Takovým nádržím se říká kryogenní, jelikož teploty, při kterých vodík uchovávají, se pohybují okolo $-252,8^{\circ}\text{C}$, což je teplota varu vodíku při atmosférickém tlaku. Poměr hmotnosti vodíku a váhy systému (objemová hustota) dosahuje i přes nutnost použít velmi účinnou tepelnou izolaci větších hodnot než u nádrží s plynným, stlačeným vodíkem. Celý systém je však energeticky velmi náročný. Už samotné zkapalnění vodíku dosahuje až 40% energie uložené v palivu. Navíc se při zvýšení teploty začíná vodík odpařovat, čímž se zvětšuje tlak v nádrži, a při dosažení maximálního pracovního tlaku nádrže je třeba začít vodík pomocí pojistného ventilu odpouštět. Takto se může ztrácet až 3% uloženého vodíku denně [15]. Tento problém je možné řešit jímáním uniklého vodíku, jeho následnou kompresí a uložením do tlakové nádrže. Zůstává však otázkou, zda by takový systém nepřišel o svoji hlavní výhodu proti tlakovým nádržím, kterou je vysoká objemová hustota. Tuto technologii využívaly prototypy BMW 750lh 1999 a Mini Hydrogen 2001. V obou případech byl však vodík spalován ve spalovacím motoru.



Obrázek 4.4: Porovnání objemových a hmotnostních kapacit nádrží na stlačený a kapalný vodík [15]

Skladování vodíku v tlakových nádržích i v kapalné formě patří mezi tradiční technologie, které se vývojově blíží svému vrcholu. Existují však také alternativní technologie, které se zatím nevyužívají, ale do budoucna mají určitý potenciál. Tím je myšleno hlavně ukládání vodíku do hydridů, uhlíkatých struktur, skleněných mikro-kuliček a chemických sloučenin obsahujících vodík.

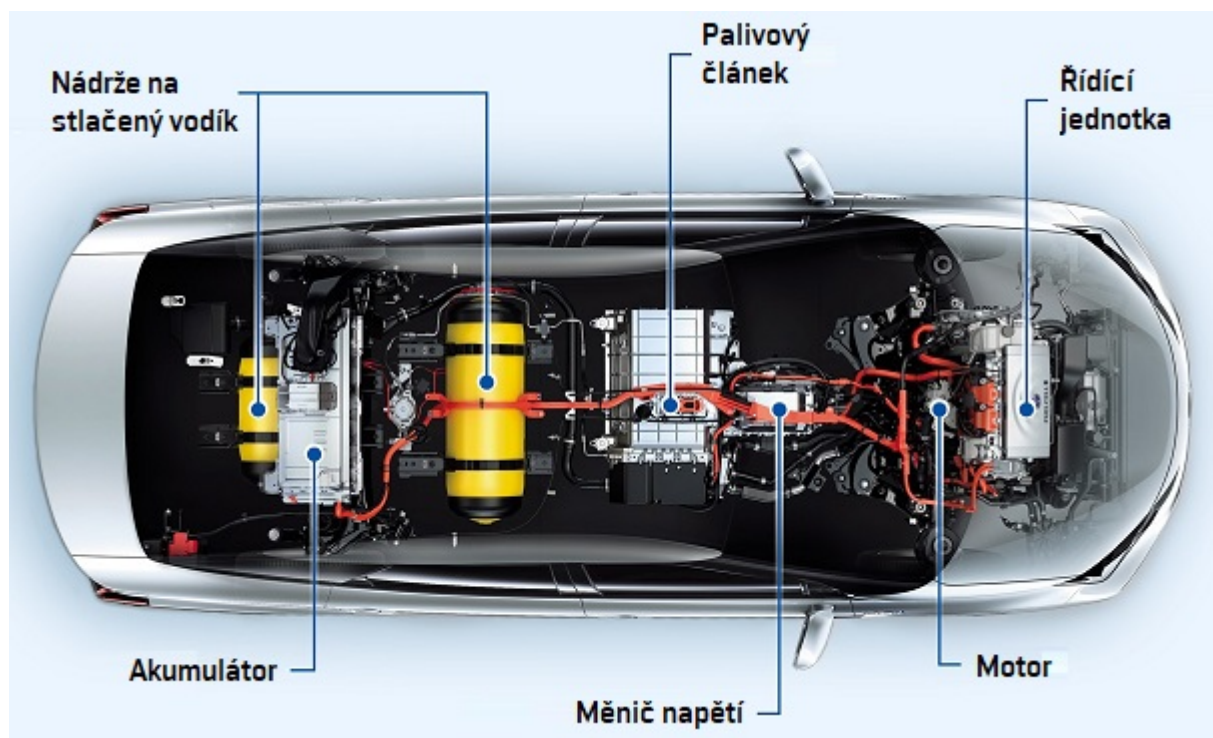
Ukládání vodíku do hydridů, tedy materiálů na bázi kovů slibuje vysokou objemovou i hmotnostní hustotu, ale problém představuje zejména vysoká teplota vznikající při uvolňování vodíku a vysoká cena hydridu. Technologie uhlíkatých nanostruktur využívá ukládání molekul vodíku do vysoko-porézní struktury a dosahuje hmotnostní kapacity až 7% hm. Stejně jako technologie skleněných mikro-kuliček je však zatím pouze ve fázi vývoje. Poslední alternativní metodou je ukládání do uhlovodíkových sloučenin. Může se jednat například o propan, butan, zemní plyn nebo také benzín a naftu. Výhodou těchto nosičů je vysoká hmotnostní hustota vodíku, ale při použití pro zásobování palivového článku je třeba systém doplnit reformátorem paliva, který z uhlovodíků dokáže vodík získávat. Takovými systémy se zabývá kapitola 5.5.

4.1.3. Rozmístění součástí do prostoru karoserie

Při pohledu na schéma zapojení jednotlivých součástí FCV by se dalo říci, že principem mají velmi blízko dnešním HEV se sériovým uspořádáním. Prostorové uspořádání součástí v karoserii vozidla je však odlišné.

Z minima, či dokonce absence mechanických propojení jednotlivých součástí plyne mnoho možností rozložení celého systému do prostoru karoserie. Z toho se konstruktéři snaží vytěžit co nejvíce a například v případě Toyoty Mirai se podařilo dosáhnout rozložení hmotnosti, při kterém nepatrně více váhy připadá na zadní nápravu [16]. V kombinaci

4.1. KONSTRUKCE VOZIDLA S PALIVOVÝMI ČLÁNKY



Obrázek 4.5: Uspořádání součástí FCV [17]

s nízkým těžištěm vozu, kterého bylo dosaženo umístěním některých komponentů pod podlahu interiéru, pomáhají obě tyto vlastnosti k většímu jízdnímu komfortu a lepší stabilitě při změnách směru jízdy. Na druhou stranu je při konstrukci FCV nutné se nějak vypořádat s velkým objemem součástí pohonu a také s dodržením bezpečnosti posádky. Také kvůli tomu je vnitřní prostor automobilu od veškerých součástí pohonu oddělen plechovou podlahou nebo jinou stěnou. Toto opatření bohužel zvyšuje hmotnost už tak velmi těžkého systému. Mirai 2015 je se svými 1850kg podstatně těžší než Toyota Camry 2015 se spalovacím motorem a vahou 1470kg, která se také řadí do kategorie „mid-size“.

5. Palivové články

5.1. Historie

První zmínky o palivových článcích pochází z roku 1838. V prosinci toho roku napsal Britský fyzik a advokát William Grove článek do periodika „The London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science“ o vývoji palivového článku, který by měl používat jako palivo ropu [18]. Za krátkou dobu, v roce 1839, na Grovea navázal Německý fyzik Christian Friedrich Schönbein. Ve své teoretické práci popisoval vznik elektrického proudu z vodíku a kyslíku rozpuštěných ve vodě [19]. Grove později na základě Schönbeinovy práce sestavil první fungující palivový článek. Svojí stavbou měl velmi blízko k dnešním článkům s kyselinou fosforečnou (PAFC) [20].

Dalšího vylepšení se palivový článek dočkal v 50. letech, kdy chemici ze společnosti General Electric použili polymerní membránu vodivou pro vodíkové ionty coby elektrolyt. Později našli způsob, jak na membránu ukládat platínu, která fungovala jako katalyzátor. Těmito chemiky byli W. Thomas Grubb a Leonard Niedrach [21]. V roce 1959 předvedl Francis Bacon praktický stacionární 6 kW článek [22]. Na základě Baconových patentů vyvíjela americká firma Pratt and Whitney (a její dceřinná společnost UTC Power) technologie pro NASA v rámci kosmického výzkumu. Palivové články byly využité například v lodích projektu Apollo, kde fungovaly jako pohon a navíc byly zdrojem pitné vody pro posádku [23].

V roce 1966 sestrojilo General Motors prototyp Chevrolet Electrovan, první silniční vozidlo s palivovým článkem. Používalo článek s polymerní membránou (PEMFC), dosahovalo maximální rychlosti 113 km/h a mělo dojezd 193 km. Mělo pouze dvě sedadla, protože zbytek prostoru zaujímaly palivové články a velké nádrže s vodíkem a kyslíkem. Projekt byl ukončen, protože sériová výroba by se GM nevyplatila [24].

Dalším projektem, který stojí za zmínku, bylo dílo Rogera Billingse z roku 1991, kdy upravil elektromobil Ford Fiesta pro pohon palivovým článkem [25]. V roce 2001 byly představeny první nádrže 4. typu, které umožňují uskladnění vodíku pod tlakem až 70MPa [26]. To přineslo možnost vyrábět menší nádrže s větší kapacitou a krátce poté se začaly objevovat první automobily s palivovými články, ke kterým měla přístup i veřejnost.

Prvním vozidlem s palivovým článkem, dodaným pro soukromé účely, se stala v roce 2003 Honda FCX. Po modelu FCX přišlo ještě několik různých modelů od dalších automobilek, například Ford Focus FCV (2003), Nissan X-Trail FCV (2003), Mercedes Benz F-Cell (2005), či Chevrolet Equinox FC (2007). Ve všech zmíněných případech šlo o nějakou formu pronájmu a vozidla nebylo možné od automobilky úplně odkoupit. Jedním z mála FCV, které je možné koupit, je například Toyota Mirai. Ta je od roku 2016 dostupná kromě Japonska a USA, kde jsou FCV nejprodávanější, také ve Velké Británii, Dánsku, Německu, Belgii a Norsku. Mirai je zároveň s více než 5300 prodanými kusy také nejprodávanějším FCV na světě [6].

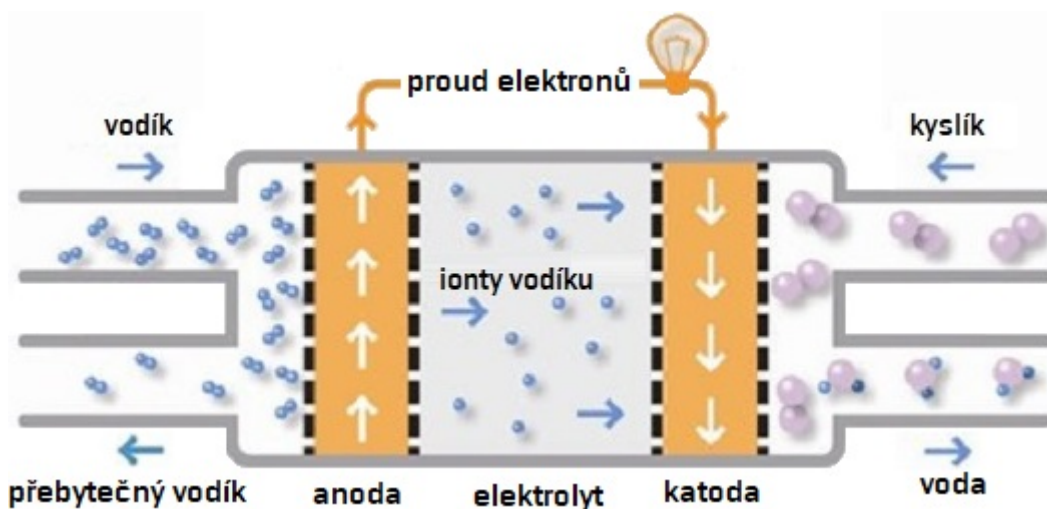
5.2. Základní princip

Palivový článek je typ galvanického článku, který mění chemickou energii paliva na elektrickou energii. Dochází v něm k elektrochemické reakci mezi vodíkem a kyslíkem, či jiným oxidačním činidlem. Na rozdíl od baterií, kde se chemická energie čerpá z chemikálií přímo

5.3. ÚČINNOST

v elektrodách, vyžadují palivové články k udržení reakce stálý přísun paliva a oksylichovadla. Dokud je do článku přiváděno palivo a oksylichovadlo, palivový článek je schopný nepřetržitě tvorby elektřiny.

Existuje více druhů palivového článku. Všechny články však mají anodu, katodu a elektrolyt. Použitý materiál elektrod a jejich struktura je závislá na použitém palivu a oksylichovadlu. Na anodu se přivádí palivo a díky katalyzátoru na povrchu elektrody dochází k jeho oxidaci. Při oxidaci se z atomů paliva uvolňují elektrony, které dále putují vnějším elektrickým obvodem od anody ke katodě, a tím dochází v obvodu ke vzniku proudu. Na katodě díky jinému katalyzátoru probíhá redukce, při níž přijímají atomy oksylichovadla volné elektrony, které prošly obvodem a zároveň reagují s kladnými ionty paliva, které ke katodě prošly elektrolytem.



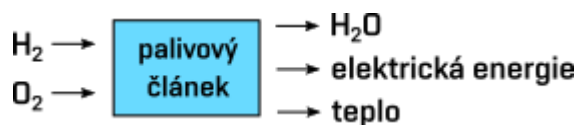
Obrázek 5.1: Palivový článek, ve kterém je palivem vodík a oksylichovadlem kyslík [33]

Jednotlivé palivové články dosahují relativně nízkého napětí (reálně okolo 0,7 V) [27]. Články je však možné řadit do série pro dosažení vyššího napětí, či paralelně pro dosažení vyššího proudu. Dalším způsobem, jak zvýšit proud jednotlivých článků, je zvětšení plochy jejich elektrod. Pro dosažení maximálního proudu sestavy je také nutné, aby bylo množství přiváděných reakčních chemikálií do jednotlivých článků vyvážené [28].

Kromě elektřiny produkují palivové články také vodu a teplo a v závislosti na zdroji energie rovněž velmi malé množství oxidu dusičitého nebo jiné emise. Účinnost palivových článků se obvykle pohybuje mezi 40-60%, avšak při využití odpadního tepla lze dosáhnout účinnosti až 85%.

5.3. Účinnost

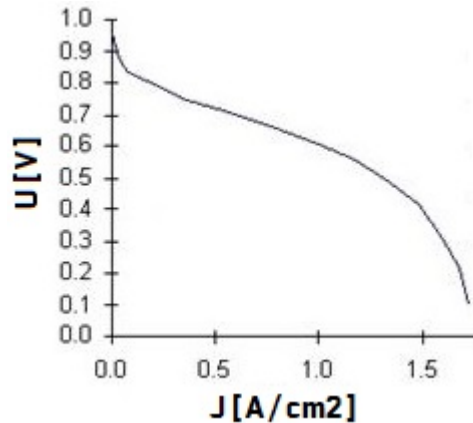
Podobně jako u spalovacích motorů lze také u palivových článků vyjádřit jejich účinnost. Dochází v nich k přeměně chemické energie paliva na elektrickou energii a teplo.



Obrázek 5.2: Vstupní látky a produkty palivového článku

5.3.1. Napěťová účinnost

Napětí na elektrodách palivového článku se mění v závislosti na jeho zatížení, přičemž nejvyššího napětí dosahuje při minimálním zatížení. Následující graf zobrazuje závislost napětí na svorkách článku jako funkci proudové hustoty (proud na jednotku plochy membrány) odebírané externí zátěží.



Obrázek 5.3: Napětí článku v závislosti na proudové hustotě [29]

Jedním ze způsobů jak vyjádřit účinnost přeměn v palivovém článku je jeho napěťová účinnost. Ta se rovná podílu skutečného napětí na svorkách a maximálního dosažitelného napětí.

$$\eta_V = \frac{U}{U_{max}} \quad (5.1)$$

Průběh grafu pak naznačuje, jak by vypadal graf závislosti napěťové účinnosti na proudové hustotě odebírané externí zátěží.

5.3.2. Termodynamická účinnost

Z paliva používaného v palivových článcích lze většinou získat energii také ve formě tepla díky spalování. Nejjednodušším vyjádřením maximální teoretické účinnosti palivového článku pak může být podíl elektrické energie, kterou článek produkuje, a právě této tepelné energie.

$$\eta_{max} = \frac{W}{Q} \quad (5.2)$$

Vyprodukovaná energie W zde představuje změnu Gibbsovy volné energie ΔG a teplo Q získané spalováním lze vyjádřit také jako změnu entalpie ΔH .

$$\eta_{max} = \frac{G}{H} \quad (5.3)$$

Rovnice přeměny ve článku, kde vstupuje vodík jako palivo a kyslík jako okysličovadlo (např. PEMFC):



Hodnoty Gibbsovy volné energie a entalpie pro látky, které se přeměny 5.4 účastní:

5.4. TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Tabulka 5.1: Hodnoty Gibbsovy volné energie a entalpie

	G[kJ/mol]	H[kJ/mol]
H_2	0	0
O_2	0	0
H_2O	-237	-285

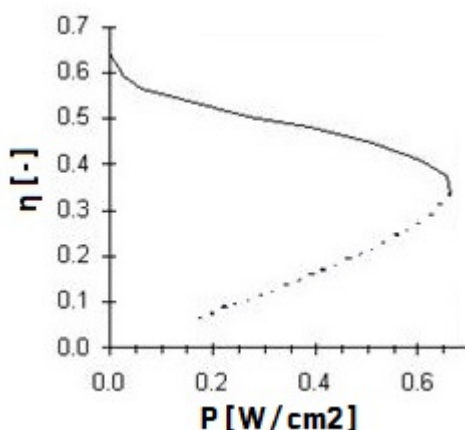
Pomocí vzorce 5.3 je možné pro takový článek vypočítat maximální termodynamickou účinnost následujícím způsobem:

$$\Delta G = G_P - G_L = G(H_2O) - [G(H_2) + \frac{1}{2} \cdot G(O_2)] = -237 \text{ kJ/mol} \quad (5.5)$$

$$\Delta H = H_P - H_L = H(H_2O) - [H(H_2) + \frac{1}{2} \cdot H(O_2)] = -285 \text{ kJ/mol} \quad (5.6)$$

$$\eta_{max} = \frac{G}{H} = \frac{-237}{-285} = 0,83 \quad (5.7)$$

Maximální účinnost těchto článků je tedy 83%. Ve skutečnosti je potřeba u palivových článků počítat také se ztrátami, které při jejich fungování vznikají. Jde například o ztráty na elektrodách vlivem jejich odporu a ztráty vzniklé změnou koncentrace reakčních látek na povrchu elektrod. Při uvážení všech typů ztrát vznikne graf účinnosti, který má podobný průběh jako závislost napětí na svorkách na proudové hustotě odebírané externí zátěží (obr. 5.3).



Obrázek 5.4: Účinnost v závislosti na výkonu článku [29]

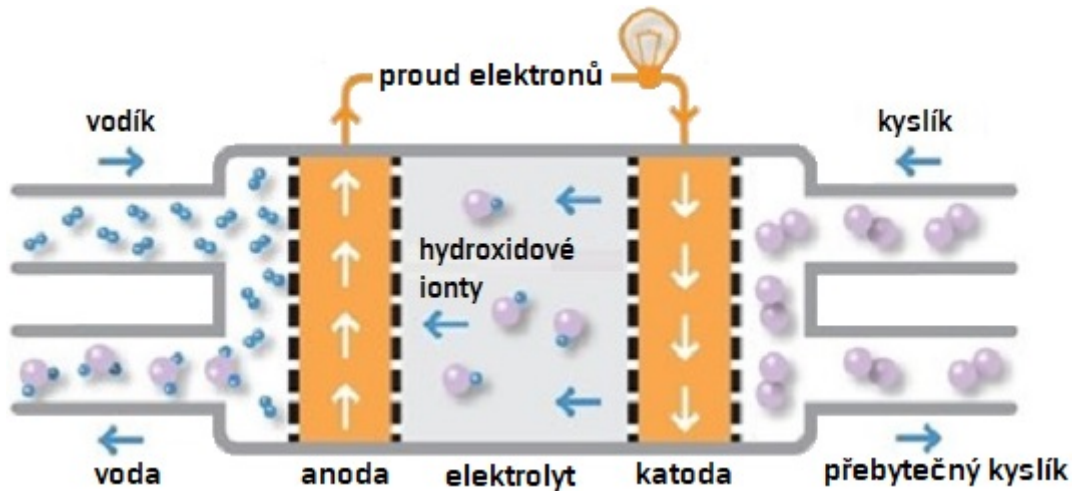
5.4. Typy palivových článků

Jak již bylo řečeno, existuje více druhů palivových článků. Navzájem se liší použitým elektrolytem a od toho se odvíjející provozní teplotou. Některé typy lze aplikovat pro mobilní zařízení, ale existují také typy, pro které se hodí pouze stacionární použití.

5.4.1. S alkalickým elektrolytem

Palivový článek s alkalickým elektrolytem (alkaline fuel cell = AFC) byl vynalezen Francisem Baconem a později byl používán agenturou NASA jako zdroj energie a pitné vody

v lodích programu Apollo a v raketoplánech [23]. Jako elektrolyt používají roztok nějakého alkalického hydroxidu (nejčastěji KOH, či NaOH) a vody. Palivem je vodík a jako okysličovadlo musí být použitý čistý kyslík, nebo alespoň vzduch co nejvíce očištěný od oxidu uhličitého.



Obrázek 5.5: Princip AFC [30]

AFC dosahují účinnosti až 70%. V případě, že je elektrolytem vodný roztok, bývá provozní teplota nižší než 90°C. Může však dosahovat až 230°C, pokud je elektrolyt ve formě taveniny. U alkalických článků není nutné používat katalyzátory na bázi vzácných kovů. Nejčastěji používaným katalyzátorem v AFC je nikl [30].

Výhody:

- Dosahují účinnosti až 70%
- Levné na výrobu (levný katalyzátor)

Nevýhody:

- Elektrolyt je citlivý na oxid uhličitý
- Nutnost dodávat čistý kyslík
- Agresivní elektrolyt
- Nízká životnost

V současné době probíhá výzkum alkalických článků s membránou namísto kapalného elektrolytu. Tyto články slibují vyšší odolnost vůči oxidu uhličitému, což by umožnilo použití kyslíku z atmosféry a odpadla by tak nutnost vybavovat vozy další nádrží. Technologie alkalických článků s membránou v tuto chvíli není dostatečně vyspělá pro použití v automobilech. Dostává se jí však velkého zájmu vědců, a navíc jde v porovnání s PEMFC o relativně nedávný vynález. V budoucnu se tedy dá očekávat významný posun ve vývoji této technologie.

Co se týče AFC, jejich použití v konstrukci automobilu je možné. Příkladem může být přestavba vozu Austin A40, který v sedmdesátých letech zkonstruoval Karl Kordesch a

5.4. TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

sám ho několik let provozoval [31]. AFC využila v konstrukci prototypu vozu pro Londýnské taxikáře také firma ZEVCO v roce 1998 [32]. V porovnání s moderními PEMFC články mají AFC nižší životnost, ale hlavně jsou závislé na čistém kyslíku. Kromě vodíku by takové automobily buď musely tankovat i kyslík, což by celý systém rozšířilo o další nádrž, nebo by musely být vybaveny zařízením, které by atmosférický vzduch očistovalo od oxidu uhličitého. V obou případech se díky složitosti a ceně systému smazávají výhody AFC článků proti článkům PEMFC.

5.4.2. S polymerní membránou

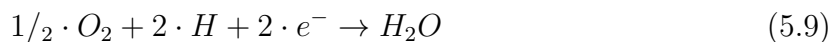
U článků s polymerní membránou (proton exchange membrane fuel cells = PEMFC) je jako elektrolyt použita polymerní membrána vodivá pouze pro ionty vodíku. Schopnost membrány přenášet ionty vodíku je závislá na vlhčení jejího povrchu. K tomu je využívána voda, která je jedním z produktů reakce v článku. Množství vody na membráně je třeba regulovat, protože ovlivňuje efektivitu celého procesu. Příliš mnoho vody může membránu zatopit, a naopak její nedostatek ji může vysušit [33]. Katalyzátorem je nejčastěji platina nanášená na povrch obou elektrod. Ta je kvůli nízké provozní teplotě článku je citlivá na katalytické jedy, hlavně na oxid uhelnatý. Palivem PEMFC článků je vodík a okysličovadlem kyslík, který je možné dodávat buď v čisté formě, či přímo jako součást atmosférického vzduchu.

Schéma PEMFC lze nalézt na obrázku 5.1.

Reakce na anodě:



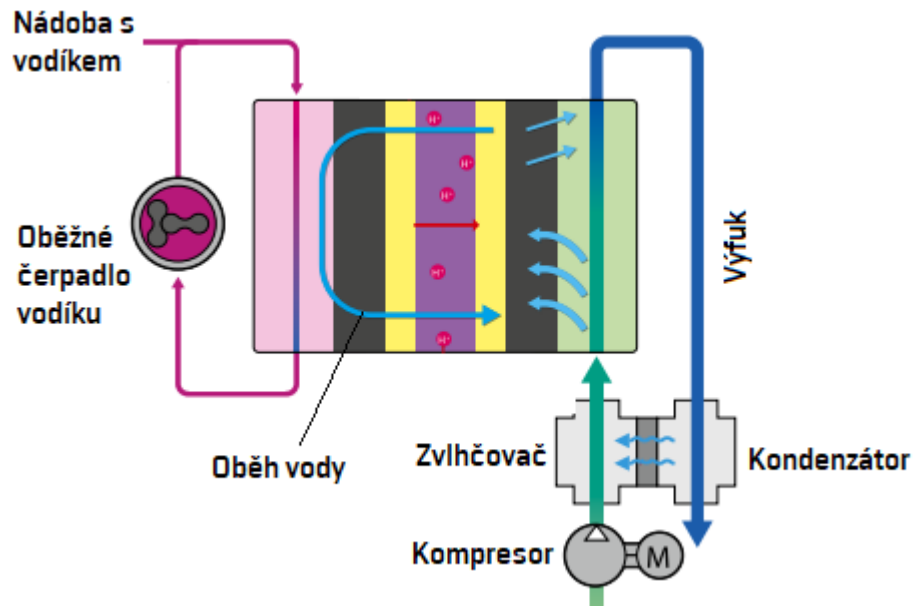
Reakce na katodě:



Vlhčení membrány

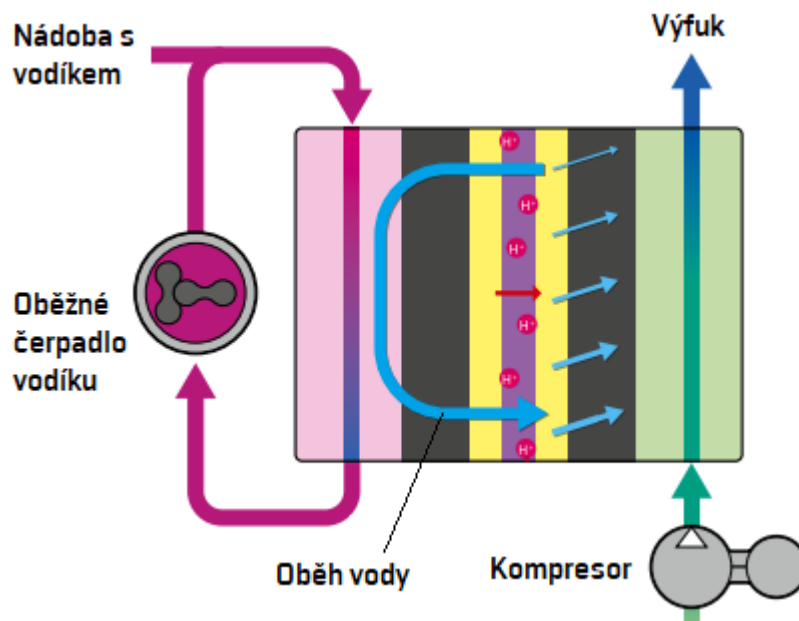
Důležitou součástí PEMFC článků je systém vlhčení membrány. Jak již bylo zmíněno, její vlhkost ovlivňuje schopnost přenášení iontů vodíku a kromě vysoušení hrozí i její „zatočení“. K vysoušení dochází hlavně kvůli jevu, kterému se říká elektroosmóza a způsobuje ho unášení molekul vody ionty vodíku, které v elektrolytu cestují směrem od anody ke katodě. Naopak k zatopení může docházet při neefektivním odvádění vody od katody, kde se voda shromažďuje a následně díky difuzi proniká do membrány [34]. Existují dva způsoby, kterými lze vlhkost udržovat na potřebné úrovni. Dříve se k tomuto účelu používal externí zvlhčovač vzduchu přiváděného do článku. Toto řešení využívá k vlhčení membrány difuzi na stejném principu jako při zatopení článku, avšak množství přiváděné vody je zde regulováno. Voda používaná k vlhčení je získávána z výfukových par pomocí kondenzátoru, který je součástí zvlhčovače.

Modernějším způsobem, jak zvlhčovat membránu, je použití systému s lepší vnitřní cirkulací vody. Od předchozího systému se kromě absence zvlhčovače liší trochu lepším naladěním, přičemž lepší cirkulace vody lze dosáhnout například použitím tenčí membrány nebo přidáním katalyzátorů do jejího materiálu. Tento systém zabírá méně místa, je



Obrázek 5.6: PEMFC s externím zvlhčovačem [14]

lehčí, jednodušší, a navíc oproti systému se zvlhčovačem odpadá ztráta energie spojené s vlhčením vstupního vzduchu a kondenzací výstupních par.



Obrázek 5.7: PEMFC bez zvlhčovače [14]

Výhody:

- Fungují při nízkých tlacích a teplotách
- Pevný elektrolyt – nehrozí koroze částí článku ani unikání elektrolytu
- Prostorově nenáročný – velký měrný výkon
- Rychlý start systému

5.4. TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

- Fungují až do -25°C (venkovní teplota)
- Dlouhá životnost (až 50000h)

Nevýhody:

- Drahý elektrolyt (membrána)
- Drahý katalyzátor – omezené zdroje platiny
- Špatně snáší oxid uhelnatý v palivu – je nutné dodávat čistý vodík
- Citlivý systém oběhu vody

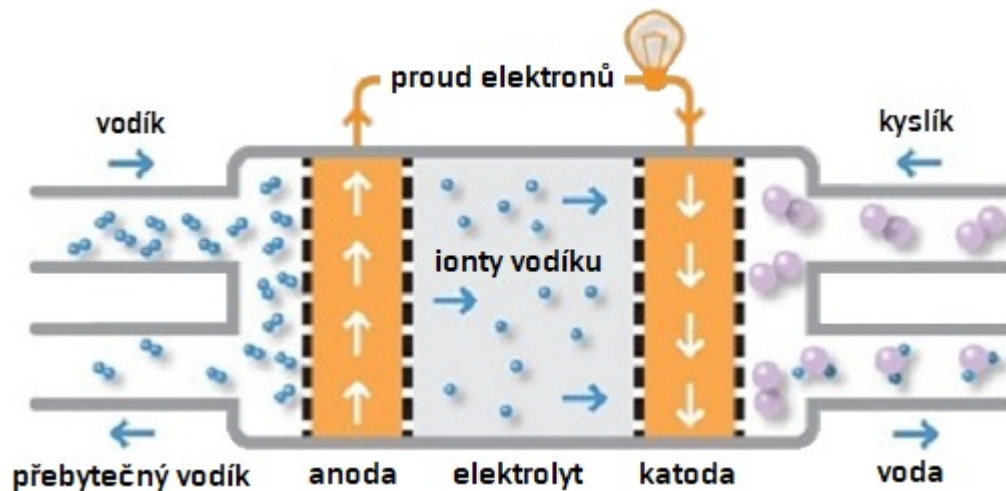
Kromě nízkoteplotních PEMFC článků existují také vysokoteplotní články. Na rozdíl od nízkoteplotních článků, které mají membránu na vodní bázi, je zde použita membrána na bázi minerální kyseliny, díky čemuž odpadá nutnost vlhčení a provozní teplota tak může dosahovat až 200°C . S vyšší provozní teplotou se navíc snižuje citlivost katalyzátoru vůči oxidu uhelnatému [35]. Jejich konstrukce je díky absenci vlhčení jednodušší, ale kvůli vysoké provozní teplotě nejsou vhodné pro mobilní zařízení.

Články s polymerní membránou jsou považovány za nejvhodnější články pro pohon osobních automobilů. Svědčí o tom také fakt, že všechny tři aktuálně nabízené vozy s palivovými články, tj. Toyota Mirai, Hyundai ix35 FCV a Honda Clarity využívají právě tuto technologii. Největší nevýhodou PEMFC, bránící jejich masovému rozšíření, je velké množství drahé platiny potřebné k pokrytí elektrod. Právě možnosti efektivnějšího nanášení tohoto katalyzátoru teď zkoumá tým pod vedením profesora Vladimíra Matolína z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy. V roce 2014 se mu podařilo snížit množství použité platiny na anodě zhruba 50x v porovnání s tehdejšími standarty a aktuálně pracuje na vylepšení technologie nanášení katalyzátoru také na katodu [36].

5.4.3. S kyselinou fosforečnou

Palivové články s kyselinou fosforečnou (phosphoric acid fuel cells = PAFC) se skládají z anody a katody, vyrobené nanesením tenké vrstvy katalyzátoru (na bázi platiny) na uhlíkový list, a dále matrice, která slouží k fixaci elektrolytu. Elektrolytem je kyselina fosforečná (H_3PO_4) a k výrobě matrice se může použít teflon, azbest, či karbid křemíku (SiC) [37]. Kyselina má korozivní účinky a při nižších teplotách by docházelo k otravě katalyzátoru oxidem uhelnatým. PAFC však fungují při teplotách okolo 200°C , což umožňuje použití paliva s malou koncentrací oxidu uhelnatého minimálními sklony k otravě [38]. PAFC jsou odolné také vůči oxidu uhličitému, a díky tomu lze jako palivo použít plyn z parního reformingu bez jakékoliv úpravy a jako okysličovadlo vzduch.

Články s kyselinou fosforečnou mívají nižší účinnost produkce elektřiny než ostatní druhy palivových článků, obvykle okolo 40-50%. Pokud je však odpadní teplo dále využito v rámci kogenerování, může účinnost dosahovat až 80% [39]. PAFC články nacházejí uplatnění nejčastěji ve stacionárních generátorech.



Obrázek 5.8: Princip PAFC [37]

Výhody:

- Méně citlivé na čistotu paliva a okysličovadla
- Spolehlivé
- Vysoká životnost – až 40000h

Nevýhody:

- Studené starty článku škodí
- Agresivní kapalný elektrolyt
- Vysoká cena

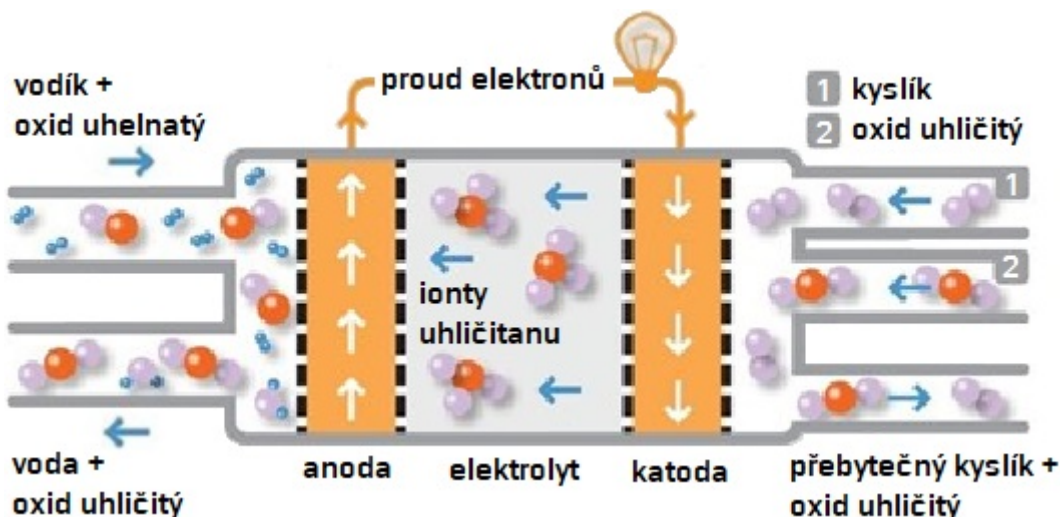
Články PAFC vyžadují pro optimální chod velmi úzký rozsah pracovních teplot. Při příliš nízké teplotě hrozí otrava anody oxidem uhelnatým, a naopak při příliš vysoké teplotě hrozí rozklad elektrolytu [40]. Hlavně kvůli náchylnosti na studené starty tyto články nejsou vhodné pro pohon osobních automobilů.

5.4.4. S tavenými uhličitany

V článcích s tavenými uhličitany (molten carbonate fuel cells = MCFC) je jako elektrolyt používána tavenina směsi alkalických uhličitánů, která je fixovaná v porézní keramické matici. Nejčastěji používanými solemi jsou uhličitán lithný (Li_2CO_3), uhličitán draselný (K_2CO_3) a uhličitán sodný (Na_2CO_3) [41].

Fungují za vysokých teplot, okolo 650°C , což přináší několik výhod. Vysoká teplota zvyšuje rychlost chemické reakce, a není tedy třeba používat katalyzátory na bázi vzácných kovů. Místo nich lze použít např. katalyzátor na bázi niklu. Navíc se díky vyšší teplotě v porovnání s ostatními typy palivových článků snižuje sklon k otravě článku oxidem uhelnatým, a MCFC díky tomu mohou fungovat bez externího reformingu i na méně čistá paliva, jako je plyn z parního reformingu fosilních paliv a bioplynu, methan, či zemní plyn. Oxidačním činidlem je vzduch [41]. Při reakcích na anodě dochází ke ztrátě iontů

5.4. TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ



Obrázek 5.9: Princip MCFC [41]

uhličitanů, a je tedy nutné doplňování oxidu uhličitého na katodu. Toho by bylo možné využít k čištění emisí spalování fosilních paliv. Přeměna paliva na elektřinu dosahuje efektivity až 60%, a při využití vzniklého tepla až 80% [42]. MCFC však mají i své nevýhody. Použití kapalného elektrolytu a vysoká provozní teplota omezují použití těchto článků na stacionární generátory. Vysoká provozní teplota a agresivní elektrolyt navíc mohou způsobovat korozi součástí palivového článku.

Výhody:

- Velký rozsah použitelných paliv
- Levné katalyzátory
- Nevyžadují externí reforming paliva
- Spotřebovávají oxid uhličitý
- Vysoký výkon a účinnost
- Výstupní pára je využitelná k další výrobě elektřiny

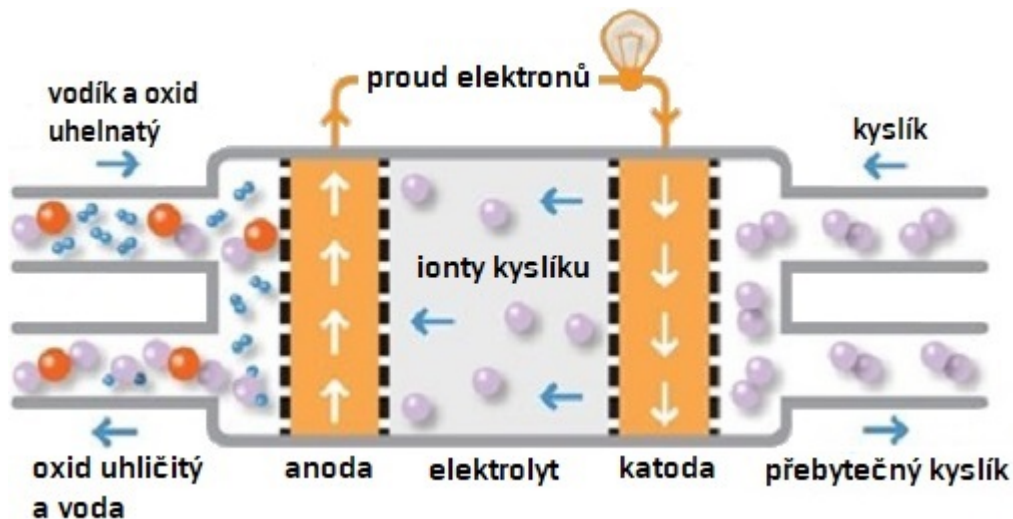
Nevýhody:

- Nižší životnost článku (9000h)
- Vysoký tlak a vysoká provozní teplota
- Sklon k otravě sírou

Články MCFC jsou společně se SOFC a PEMFC komerčně nejúspěšnějším typem palivových článků. Jsou velmi vhodné pro stacionární použití v elektrárnách, nikoliv však pro pohon automobilů. Pracují totiž při příliš vysokých teplotách, což by prodlužovalo starty, a navíc by se při velkých tepelných ztrátách snižovala jejich účinnost.

5.4.5. S tuhými oxidy

Pracovní teplota článků s tuhými oxidy (solid oxide fuel cells = SOFC) se pohybuje mezi 800-1000°C, což jsou mezi palivovými články nejvyšší teploty. Používají pevný keramický elektrolyt v podobě oxidu zirkoničitého (ZrO_2) stabilizovaný oxidem yttritým (Y_2O_3) [43]. Díky vysokým pracovním teplotám dochází k reformaci paliva přímo v článku, a je tedy možné používat různá uhlovodíková paliva včetně svítiplynu.



Obrázek 5.10: Princip SOFC [44]

Při vysokých pracovních teplotách navíc odpadá nutnost použití drahých katalyzátorů. Články je však třeba dostatečně izolovat proti ztrátám tepla, jejich startování trvá dlouho a při navrhování takových článků je třeba brát ohledy na křehký elektrolyt. U keramického elektrolytu sice nehrozí jeho vytékání, ale může hrozit praskání.

Články s pevnými oxidy nacházejí uplatnění jako velké stacionární generátory v elektrárnách, ale probíhají testy menších kogeneračních jednotek, které by mohly napájet a vyhřívat rodinné domy.

Výhody:

- Vysoká účinnost
- Spolehlivé
- Velký rozsah použitelných paliv
- Nízké emise
- Levné na výrobu
- Vnitřní reforming paliva

Nevýhody:

- Vysoká provozní teplota – dlouhý start systému
- Prostorově náročné – izolace, chlazení

5.4. TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

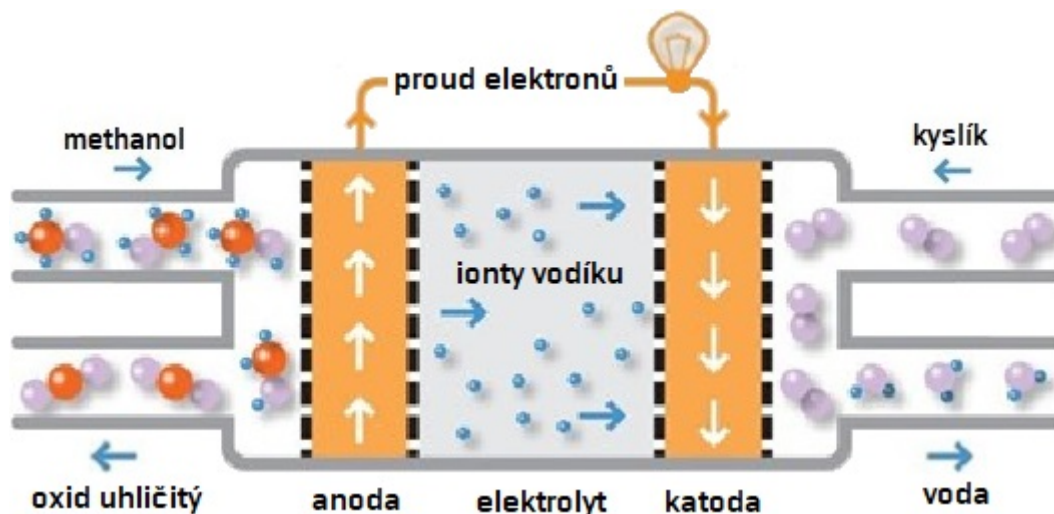
- Náchylný na teplotní rázy

Důvodem, proč se SOFC články nepoužívají pro pohon automobilů, je jejich vysoká provozní teplota a v porovnání s PEMFC nízký měrný výkon. Například kogenerační článek The Redox Cube, který chce nabízet firma Redox, slibuje výkon 25kW při váze 450kg, což se rovná měrnému výkonu 0,056kW/kg [45]. Pro porovnání, například článek PEMFC Toyoty Mirai disponuje měrným výkonem 2kW/kg [46]. Budoucí použití SOFC článků k pohonu automobilů však není nereálné. Aktuálně probíhá výzkum nízkoteplotních SOFC článků, které by nebyly omezené dlouhými starty [47]. SOFC články jako zdrojem energie pro pohon automobilů se navíc zabývá automobilka Nissan. Od roku 2016 vyvíjí prototyp e-Bio, který jako palivo používá etanol [48].

5.4.6. S přímým metanolem

Technologie palivového článku s přímým metanolem (direct methanol fuel cell = DMFC) je poměrně nedávným vynálezem. Byla vyvinuta v devadesátých letech vědci z různých amerických institucí, včetně NASA [49].

Stejně jako u PEMFC článků se zde setkáme s polymerní membránou coby elektrolytem. Rozdíl je v použitém katalyzátoru na anodě, který zde tvoří kombinace platiny a ruthenia. Při jednotlivých mezistupních reakce na anodě se zde tvoří oxid uhelnatý. Při použití katalyzátoru pouze na bázi platiny by docházelo k jeho absorpci na povrch elektrody. Díky kombinaci platiny a ruthenia k tomuto jevu nedochází, a je tak možné použití metanolu bez nutnosti externího reformingu paliva. Na katodě zůstává katalyzátor na bázi platiny [50].



Obrázek 5.11: Princip DMFC [49]

Použití metanolu jako paliva má několik výhod. Je levný, má vysokou energetickou hustotu a jeho skladování a transport je jednoduchý. Na nádrž na kapalné palivo navíc nejsou kladeny tak vysoké požadavky jako na tlakové lahve na plynná paliva.

Výhody:

- Vysoká energetická hustota metanolu

- Nízké nároky na nádrž
- Nepotřebují reforming paliva

Nevýhody:

- Nízká účinnost
- Nízké napětí a výkon
- Potřeba odvádět oxid uhličitý
- Článek spotřebovává vodu

Komerčně úspěšným využitím DMFC je konverze elektrických vysokozdvížných vozíků, kterou nabízí firma Oorja Protronics [51]. Takové vozíky nacházejí uplatnění ve skladech, kde je vyžadován jejich bezemisní provoz. Jejich hlavní výhodou proti vozíkům na čistě elektrický pohon je rychlost doplňování energie, což se projeví zejména v nepřetržitých provozech. Neméně důležitou vlastností těchto vozíků je schopnost pracovat se stejným výkonem, dokud nedojde palivo v nádrži, na rozdíl od vozíků s bateriemi. Při vybíjení baterie totiž dochází ke snižování napětí na jejich svorkách a tím je ovlivněno, jak rychle se vozík může pohybovat, či jak těžká břemena může zvedat. Zatímco vysokozdvížné vozíky z velké hmotnosti článků spíše těží, u automobilů je tomu naopak. Pro použití v automobilech se tedy DMFC články pro svůj nízký měrný výkon zatím příliš nehodí.

5.5. Shrnutí k palivovým článkům

Z předchozí kapitoly vyplývá, že ne všechny typy palivových článků jsou vhodné pro automobilní průmysl. Tím jsou myšleny například vysokoteplotní články. Použitelných technologií je více, avšak výsadní postavení zaujímají PEMFC, kterými jsou vybaveny všechny tři aktuálně nejprodávanější FCV (Toyota Mirai, Honda Clarity FCV a Hyundai ix35 FCEV). Stejně tomu bylo i v minulosti, PEMFC totiž používal například také Chevrolet Equinox a Nissan X-TRAIL FCV. Zdá se, že ani v blízké budoucnosti nás v tomto směru nečekají žádné velké změny. Honda Clarity FCV se začala vyrábět teprve v roce 2016, a lze tedy předpokládat, že nějaký čas ve výrobě ještě přetrvá. Nedávno představila nový FCV model také automobilka Hyundai. Stalo se tak v lednu tohoto roku na veletrhu CES 2018 a představen byl model NEXO, který by měl rovněž používat PEMFC články.

Jiné technologie, které by bylo možné použít k pohonu automobilu, zatím buď nejsou dostatečně vyvinuté, nebo jsou proti kombinaci PEMFC s nádrží na stlačený vodík méně výhodné. Z těchto má nejbližší k běžnému použití kombinace PEMFC článku, reformátoru metanolu a nádrže na metanol. Takový vůz by těžil hlavně z menších nároků na nádrž s palivem, a co se týče širší perspektivy i z mnoha dalších výhod metanolu oproti vodíku. Velmi blízko k tomuto konceptu má řešení dánské firmy Serenergy, která nabízí svůj 5kW PEMFC článek v kombinaci s reformátorem metanolu jako range-extender, kterým je možno dovybavit většinu elektromobilů [52]. Podobným způsobem lze reformovat například etanol, benzín nebo naftu. Při reformaci kapalných uhlovodíkových paliv (vč. metanolu) však kromě vodíku vzniká také oxid uhličitý, považovaný za jeden z hlavních

5.5. SHRNUTÍ K PALIVOVÝM ČLÁNKŮM

skleníkových plynů. Další nevýhodou, která znemožňuje prosazení této technologie, je vysoká cena reformátoru. Ten totiž používá katalyzátor na bázi platiny [53]. Cena vozidel s PEMFC články je už tak velmi vysoká a jejím dalším zvýšením o cenu reformátoru by se vozy staly neprodejnými.

Odlišný přístup zkoumá také automobilka Nissan. Pro jejich prototyp e-Bio se snaží vyvinout nízkoteplotní SOFC články schopné svojí spolehlivostí konkurovat dnešním PEMFC. Jejich výhodou by měla být schopnost přímého spalování etanolu. Ten má podobné vlastnosti a výhody jako metanol. Se slibovaným výkonem článku 5kW [48] však nemůže konkurovat například článku Hyundai NEXO, který má výkon 95kW [54]. Jeho nízkým výkonem by byla nepříznivě ovlivněna dynamika vozu a nejspíš by nesplňovala dnešní standardy. Udávaný dojezd 600km+ na 30l etanolu by znamenal spotřebu etanolu přibližně 5l/100 km, což není v porovnání se současnými automobily se spalovacími motory na etanol nijak zajímavé číslo. V roce 2016, v raném stadiu tohoto projektu, Nissan slíbil uvedení komerční verze článků na etanol již pro rok 2020 [55]. Od té doby se však na veřejnost nedostalo příliš mnoho zpráv či ukázek fungování z provozu.

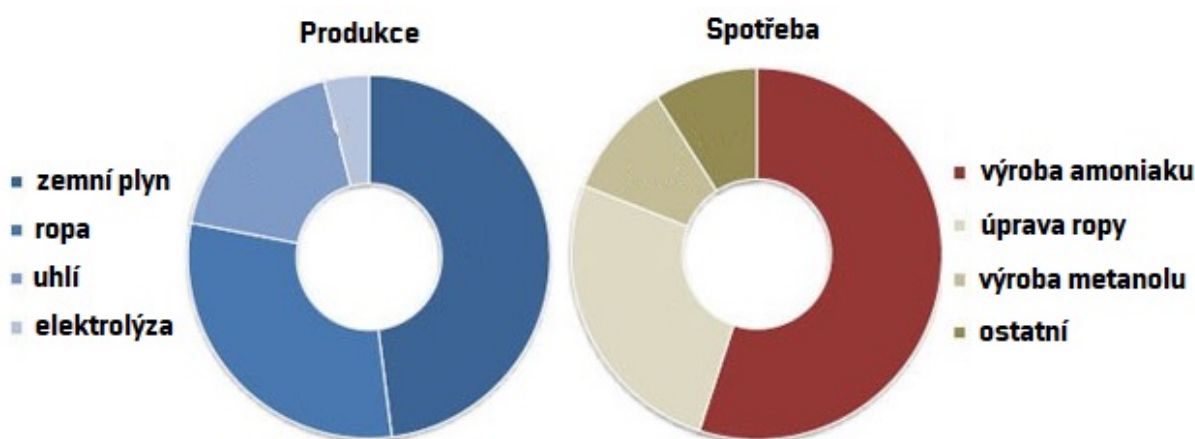
Další technologií, která zatím nebyla zcela prozkoumána, avšak pro použití v automobilech představuje určitý potenciál je technologie alkalických článků s membránou, zmiňovaná v kapitole 5.4.1.

6. Vodík

Hlavními podmínkami pro prosazení vozidel na stlačený vodík je dobrá dostupnost samotného vodíku, jeho přijatelná cena a ekologie jeho produkce. V této kapitole bude vysvětlena problematika získávání vodíku, jak se s ním dále nakládá a také možný budoucí vývoj.

6.1. Získávání vodíku tradičními způsoby

V dnešní době pochází většina vyrobeného vodíku z fosilních paliv. Přibližně 48% celkové produkce se získává parní reformací zemního plynu, 30% částečnou oxidací ropy, 18% zplyňováním hnědého uhlí a pouze 4% připadají na výrobu elektrolýzou [56]. Vodík se většinou vyrábí nedaleko místa, kde je později dále využíván. V současné době je nejčastěji využíván k produkci amoniaku, který dále slouží hlavně k výrobě hnojiv. Kromě produkce amoniaku je využíván také při úpravě ropy krakováním a při výrobě metanolu.



Obrázek 6.1: Produkce a využití vodíku [57]

Při výrobě vodíku z fosilních paliv vždy vznikají emise oxidu uhličitého nebo oxidu uhelnatého, a pohon FCV (nebo napájení palivových článků obecně) takto získaným vodíkem tudíž není bezemisní, i když emise nevznikají v místě jeho použití.

6.2. Získávání vodíku alternativními způsoby

Aby se technologie palivových článků na vodík stala skutečně zelenou technologií, je potřeba, aby se samotný vodík získával buď elektrolýzou z vody použitím elektřiny z obnovitelných zdrojů, nebo jinými alternativními způsoby.

Biologická produkce

Pro ekonomicky i ekologicky výhodné získávání vodíku by mohly být využívány také mikroorganismy. Procesy, které k produkci vodíku využívají řasy a bakterie, lze rozdělit do dvou skupin podle typu vstupní látky. Fotolytické procesy získávají vodík štěpením vody a fermentační procesy využívají biomasu.

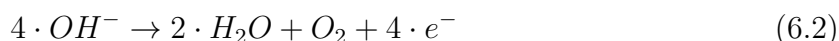
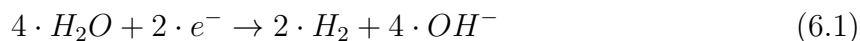
6.2. ZÍSKÁVÁNÍ VODÍKU ALTERNATIVNÍMI ZPŮSOBY

Jedním z nejznámějších fotolytických procesů je přímá biofytolýza. Tento způsob využívá fotosyntézy mikrořas (zejména zelené řasy *Chlamydomonas reinhardtii*) k přeměně solární energie na energii chemickou, která je dále využita ke štěpení vody. Při dodržení velmi nízké hladiny kyslíku, na který je celá reakce velmi citlivá, lze dosáhnout účinnosti až 20%. I přes velkou výhodu této technologie, která spočívá ve využití obyčejné vody, se jedná o velmi problematický, ekonomicky neefektivní proces s nízkou účinností [58].

Perspektivnější technologií biologické produkce vodíku jsou fermentační procesy. Vstupní surovinou je biomasa z komunálních a průmyslových odpadních vod, odpadů na řízených skládkách, exkrementů z velkochovů užitkových zvířat a odpadů potravinářské výroby. Fermentační procesy jsou zpravidla anaerobní, tedy bez přístupu kyslíku a v případě tmavé fermentace také bez přístupu světla. O přeměnu organických odpadů, bohatých na sacharidy, vodík a oxid uhličitý, se při tmavé fermentaci starají bakterie rodu *Enterobacter*. Přeměna probíhá při teplotách mezi 30 – 80°C a účinnost se pohybuje mezi 60 – 80% [58]. Kromě tmavé fermentace existuje také fotofermentace, která využívá fotosyntetických bakterií, avšak tato technologie trpí na stejné problémy jako fotolytické procesy.

Fotoelektrochemický rozklad vody

Dalším způsobem jak využít solární energii k produkci vodíku je fotoelektrochemický rozklad vody. Tento proces probíhá v článku, který je celý ponořený do vody. Ta zde plní funkci elektrolytu a zároveň také vstupní látky pro přeměnu. Dopadem slunečních paprsků na foto-elektrodu dochází v její blízkosti k excitaci volných elektronů, které dráty putují k druhé elektrodě, kde za vzniku vodíku a hydroxidové skupiny (OH^-) reagují s vodou. Vzniklé hydroxidové skupiny poté putují elektrolytem zpět k foto-elektrodě, kde reagují s elektronovými děrami (vzniklými v první fázi přeměny) za vzniku vody a kyslíku [59]. Chemické rovnice jsou tedy následující:



Na elektrodách fotoelektrochemického článku tedy dochází k elektrolýze. Tento článek tedy plní zároveň funkci fotovoltaiického článku a článku, ve kterém probíhá elektrolýza.

Povrch elektrod, který je tvořen nějakým druhem polovodiče, bohužel při přímém kontaktu s elektrolytem koroduje, čímž se mění jeho vlastnosti a snižuje životnost celého článku. Tato technologie je zatím pouze ve fázi výzkumu.

Vysokoteplotní elektrolýza

Elektrolýza vody sice patří mezi tradiční způsoby získávání vodíku a vysokoteplotní elektrolýza je z technologického hlediska pouze její podskupinou, ale reálně není zdaleka tak často využívaná, a proto je možné ji zařadit mezi alternativní způsoby.

Elektrolýza probíhá po ponoření elektrod do vody, přičemž elektrodami protéká stejnosměrný proud. Na katodě, kde do elektrolytu vstupují elektrony, se začne redukcí tvořit vodík a hydroxidové skupiny (OH^-), které dále putují vodou (elektrolytem) k anodě a oxidačně reagují za vzniku kyslíku, vody a elektronů, které tím opouštějí elektrolyt a vrací se zpět do obvodu [60].

Při vysokoteplotní elektrolýze tvoří část vstupní energie teplo. Čím je teplota vyšší, tím je odběr elektřiny nižší, a při teplotě nad 2500°C dokonce není potřeba k rozkladu vody dodávat žádnou elektrickou energii, protože začne docházet k termolýze. Proces výroby vodíku vysokoteplotní elektrolýzou dosahuje účinnosti až 45%, což je více, než dosahuje obyčejná elektrolýza (až 35%) [61].

Vysokoteplotní elektrolýza bývá často zmiňována v souvislosti s vývojem nejmodernějších jaderných reaktorů, tzv. IV. generace. U těch se počítá s možností spalovat nejen uran 235, který se používá jako palivo v současných reaktorech, ale také izotop uran 238 a thorium 232. Navíc jsou kromě jiných kladeny také požadavky na hospodárnější využití paliva a vznik minimálního množství jaderného odpadu. Aktuálně se sdružení 14ti zemí „Generation IV International Forum“ zaměřuje na design 6ti různých koncepcí takových reaktorů, z nichž jsou 4 schopné vyrábět kromě elektřiny také vodík, buď pomocí vysokoteplotní elektrolýzy, nebo termochemickými metodami [62].

Termochemické štěpení vody

Termochemické metody produkce vodíku využívají cyklu reakcí, který rozkládá vodu na vodík a kyslík. Vstupní energií je u některých procesů pouze teplo, ale existují také hybridní systémy, ve kterých je využívána kombinace tepla i elektřiny. Cykly reakcí jsou uzavřené, což znamená, že dochází k recyklaci použitých chemických látek a neustále je potřeba dodávat pouze vodu.

Perspektivní metodou je například siřičito-jódový termochemický cyklus. Do reakce vstupuje oxid siřičitý a jód a během několika reakcí vzniká kyselina jodovodíková a kyselina sírová. Nejvíce energie vyžadují endotermní reakce, při kterých dochází k rozkladu kyselin. Kromě vysokých teplot je problémem při produkci vodíku touto metodou také velká agresivita vznikajících kyselin. Zejména v průmyslovém měřítku by mohly být dalším problémem také vysoké nároky na kontrolu průběhu reakcí. V laboratorních podmínkách je možno dosáhnout účinnosti přes 52% [61].

Stejně jako v případě vysokoteplotní elektrolýzy se s termochemickými metodami produkce vodíku počítá jako se součástí koncepce budoucích nukleárních reaktorů IV. generace.

6.3. Ukládání vodíku

Vodík lze ukládat několika způsoby. Mezi tradiční způsoby patří ukládání do tlakových nádob nebo kryogenních nádob, ve kterých je vodík udržován v kapalném skupenství. Kromě tradičních způsobů probíhá také vývoj různých alternativních způsobů. Všemi možnostmi ukládání vodíku se zabývá kapitola 4.1.2.

6.4. Distribuce vodíku

Důležitou otázkou při eventuálním nástupu vodíkového hospodářství je způsob, kterým bude vodík transportován na místo odběru. Vodík je v průmyslu využíván a určitá infrastruktura již existuje, avšak pro potřeby zásobování automobilové dopravy by bylo nutné její posílení. Existuje několik návrhů v různých fázích připravenosti na reálnou aplikaci.

6.4.1. Centralizovaná výroba a převoz v nádržích

Aktuálně nejjednodušeji realizovatelným způsobem distribuce je převoz z místa výroby na místo spotřeby buď v kryogenní nádrži, či v tlakové nádrži. Potřebné technologie jsou již vyvinuté a při menších objemech vyžaduje tento způsob nejnížší investice. Na stejném principu by měly fungovat dodávky vodíku z Austrálie do Japonska v projektu, který byl ohlášen oběma stranami teprve na začátku dubna 2018. Vodík bude vyráběn zplyňováním hnědého uhlí, následně zkapalněn a v kryogenních nádržích přepraven do Japonska [63]. Podobně by mohl být v budoucnu transportován vodík také z tzv. vodíkových farem. Jde o odlehlá zařízení, ve kterých by se vodík vyráběl z různých obnovitelných zdrojů, např. v solárních elektrárnách.

6.4.2. Výroba v místě odběru

Jak již bylo řečeno v kapitole 6.1, většina vyrobeného vodíku v dnešní době je spotřebována v místě výroby. Většinou se vyrábí ze zemního plynu, jehož distribuční soustava již existuje. Tento způsob distribuce vodíku tedy počítá s tím, že by byly čerpací stanice napojené na síť nějakého uhlovodíkového paliva, jako je např. zemní plyn nebo etanol a na místě by se pomocí reformátoru produkoval vodík. Ten by byl před odběrem stlačován pomocí kompresoru. Výstavba takových čerpacích stanic by se v dnešní době zatím nevyplatila z důvodu vysokých cen reformátorů, ale při vyšším zájmu o vodík by mohla začít dávat smysl.

6.4.3. Centralizovaná výroba a potrubní doprava

Vodík je možné dopravovat také pod nízkým tlakem plynovody, podobně jako například zemní plyn. Jediné speciální vybavení, které by čerpací stanice potřebovala pro obsluhu zákazníků by byl kompresor na stlačování vodíku.

Zajímavostí je, že vodík způsobuje v ocelových trubkách korozi a zvyšuje jejich křehkost, což může vést až ke vzniku prasklin [64]. I přesto však existují technologie, které potrubní přepravu vodíku umožňují. Potrubí sloužící k přepravě vodíku lze v praxi nalézt již v dnešní době. Například v USA existuje přibližně 2500 km potrubí, které distributoři vodíku využívají k zásobování velkých odběratelů [65]. Existující přenosovou soustavu by však nebylo možné pro doplňování nádrží osobních vozidel použít, protože nemá dostatečné pokrytí, a její rozšiřování by se zatím pro malé množství uživatelů FCV nevyplatilo. Transport vodíku tímto způsobem by dal smysl ve chvíli, kdy ho bude potřeba dodávat pro velký podíl užívaných vozidel.

6.4.4. Aktuální stav

Distribuční síť tohoto plynu není příliš rozvinutá. Pro potřeby FCV je tedy nutné zakládat čerpací stanice. Jejich výstavba je v dnešní době závislá na dotacích, jelikož podíl FCV mezi ostatními prodanými vozy je velmi malý.

I přesto existují státy, kde je možné FCV provozovat. Řeč je například o Německu, kde funguje již přes 40 čerpacích stanic na vodík a jen v roce 2017 jich vzniklo 24 [66]. Dalším známým místem, kde se FCV prodávají a díky dostatku stanic je možný jejich provoz, je Kalifornie. Největší podpoře se vodík a FCV těší v Japonsku. Již v tuto chvíli tam stojí nebo je rozpracovaných přes 100 stanic a na konci února tohoto roku se 11 tamních firem,

včetně Toyota Motor Corp a JXTG Nippon Oil & Energy, zavázalo k výstavbě dalších 80 stanic do konce roku 2022 [67]. Výhodou ostrovních států, jako jsou Japonsko nebo Hawaii, je jednodušší pokrytí celé rozlohy, po které se tamní uživatelé FCV pohybují, a právě díky dobrému pokrytí stanicemi lze očekávat, že se na těchto místech FCV rozšíří nejrychleji.

7. Ekonomie provozu vozidel s palivovým článkem

Do celkových nákladů na provoz vozidla se počítá mnoho různých položek od nákupní ceny až po dálniční známku. Cílem této kapitoly však není vyčíslit všechny tyto položky, ale zaměřit se pouze na náklady, které jsou u vozidel s palivovým článkem odlišné od nákladů spojených s provozem elektromobilu, který je mezi všemi koncepcemi alternativních pohonů pro vozidlo s palivovým článkem jeho největším konkurentem. V následující kapitole budou obě tyto koncepce z pohledu ekonomie provozu porovnány.

Nejdůležitějšími položkami v celkových nákladech na provoz FCV tedy jsou: pořizovací cena, cena paliva a náklady na údržbu systému.

Pořizovací cena

Jako modelový vůz pro další porovnávání bude použita Toyota Mirai. Verze pro Evropský trh stojí v přepočtu 1,670 mil Kč bez DPH [68]. S připočtením základní sazby DPH, 21%, činí výsledná cena 2,020 mil Kč.

Cena paliva

Naplnění nádrže Mirai vyjde v Německu na 50 Eur [69] (v ČR zatím není možné doplnit na plnou kapacitu), což při dnešním kurzu dělá přibližně 1265 Kč. Při dojezdu 502 km [70] lze dopočítat cenu za 100 ujetých kilometrů následujícím způsobem:

$$x = (1265/502) \cdot 100 = 252,0Kc/100km \quad (7.1)$$

Údržba

Zde už je vyčíslení nákladů složitější. Pro porovnání s EV je nutné počítat s náklady na údržbu palivového článku, tlakových nádrží a akumulátoru. Na druhou stranu je možné zanedbat náklady na údržbu motoru, měniče napětí a řídicí jednotky, jelikož tyto komponenty jsou pro obě koncepce velmi podobné.

Na všechny důležité součásti Mirai včetně palivového článku, nádrží a akumulátoru se vztahuje záruka 160 000 km nebo 8 let podle toho, co nastane dříve [71]. Samotné tlakové nádrže sice není nutné podrobovat žádným revizím, jako je tomu například u nádrží na LPG, ale po 15 letech od výroby je zakázáno do nich doplňovat vodík [72]. Jestli je třeba po uplynutí této doby provést pouze revizi systému, či je nutno nádrže včetně vedení vyměnit, se mi však nepodařilo zjistit.

7.0.1. Porovnání s elektromobily

Proč se kapitola zabývá porovnáním vozidel s palivovým článkem právě s elektromobily, bylo vysvětleno v úvodu předchozí kapitoly.

Pořizovací cena

Za jednoho z nejbližších konkurentů pro Mirai mezi elektromobily může být považována Tesla Model S 75. Nejbližší Tesla Store, který se nachází ve Vídni, nabízí Model 75 v přepočtu za 2,407 mil. Kč.

Cena paliva

Uživatelé Modelu S mají dvě možnosti, jak nabíjet akumulátory, a od toho se odvíjí také ceny. V případě, že nabíjí doma z nabíječky, platí pro ně ceník elektřiny jejich dodavatele. Průměrná aktuální cena v ČR je 3,82 Kč/kWh [73]. Při nabíjení akumulátorů však vznikají ztráty, které se u vozidel Tesla pohybují okolo 20% [74]. Cenu plného nabití akumulátoru Modelu S 75 o kapacitě 75 kWh lze vypočítat tímto způsobem:

$$y = (75 \cdot 1,2) \cdot 3,82 = 343,8Kc \quad (7.2)$$

Při dojezdu 401km (EPA) lze vypočítat cenu elektřiny na 100 ujetých kilometrů:

$$z = (343,8/401) \cdot 100 = 85,74Kc/100km \quad (7.3)$$

Při nabíjení z rychlo-nabíječky Tesla Supercharger platí ceník 5 Kč/kWh [75] a stejné výpočty pak vypadají takto:

$$y = (75 \cdot 1,2) \cdot 5 = 450,0Kc \quad (7.4)$$

$$z = (450,0/401) \cdot 100 = 112,2Kc/100km \quad (7.5)$$

Údržba

Jedinou citlivou součástí, kterou se EV liší od FCV, je akumulátor. Jak již bylo vysvětleno v kapitole 4.1.2, obecně se kapacita akumulátorů s věkem snižuje a v extrémních případech je po určitém čase akumulátor pro svoji nízkou kapacitu dále nepoužitelný. V případě akumulátorů Tesla se však ukazuje, že tento pokles může být velmi nízký a ani při velkých nájezdech se kapacita akumulátoru nesníží natolik, aby výrazně zhoršila dojezd vozidla.

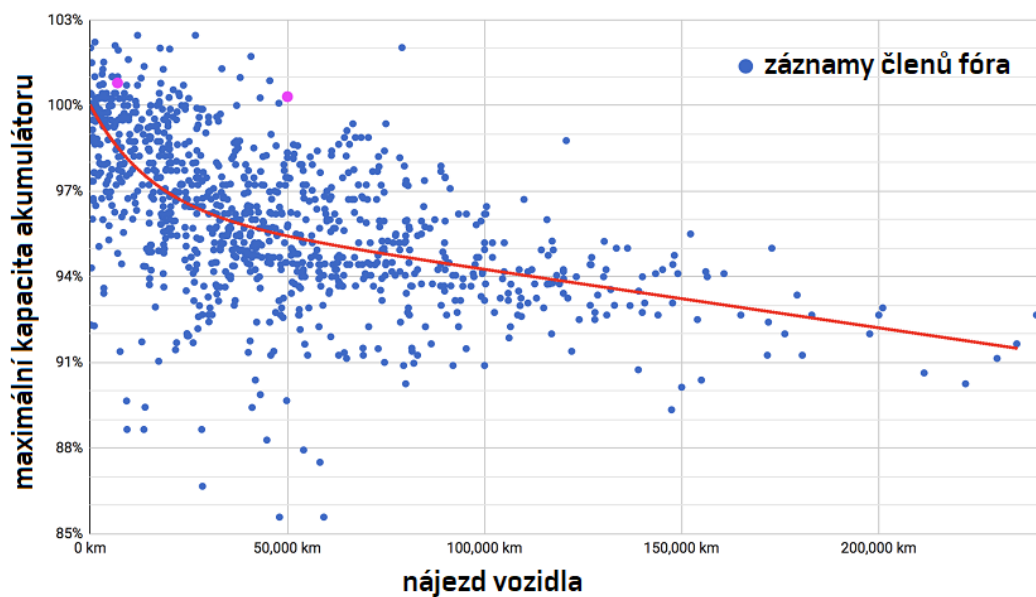
Při takto nízkém poklesu kapacity lze akumulátor označit za bezúdržbový.

7.0.2. Shrnutí

Prezentovaný pohled je velmi zjednodušený a ve skutečnosti se do výsledné ceny provozu promítne i mnoho dalších vlivů, které byly záměrně zanedbány z důvodu omezení rozsahu kapitoly. Nicméně by bylo dobré se o některých z nich alespoň zmínit.

Dotace

Téměř v celém světě buď existují nebo existovaly státní dotace na pořízení elektromobilu či vozidla na jiný ekologický pohon. Například v České republice byly minulý rok vypsány tři dotační výzvy programu Nízkouhlíkové technologie na podporu elektromobility, pro které byla alokace dohromady 290 mil Kč [76]. Takové dotace mohou výrazně ovlivnit celkové náklady na provoz automobilu.



Obrázek 7.1: Záznamy členů fóra teslamotorsclub.com v diskuzi „Belgium and the Netherlands“ [77]

Prodeje vozů se ztrátou

Při uvádění nového produktu na trh se občas společnost, která produkt nabízí, rozhodne prodávat daný produkt s finančními ztrátami ve snaze o zviditelnění, což v automobilovém průmyslu není neobvyklý jev. Tuto strategii zvolila Toyota v době, kdy na trh vstupoval první hybridní automobil Prius [78], a je tedy pravděpodobné, že podobně dnes k marketingu přistupují také výrobci FCV. Za touto teorií stojí například také Pat Cox, bývalý předseda Evropského Parlamentu, který předpokládá, že ztráty Toyoty Mirai by měly dokonce převyšovat její prodejní cenu [79]. Při uvážení takových ztrát se sice situace pro zájemce o tyto vozy nijak nemění, ale do budoucna musí být nalezen způsob, jak tuto technologii prodávat s výtěžkem, jinak její další existence nebude dávat smysl.

Tankování paliva se zvýhodněním

Dalším způsobem jak se výrobci vozidel s alternativními pohony snaží přesvědčit své zákazníky o nákupu těchto vozů, je nabízet doplňování energie za zvýhodněných podmínek. Takto nabízí například Tesla dobíjení na stanicích s rychlým dobíjením úplně zdarma pro uživatele Modelu S a Modelu X [80]. Podobný přístup má také Toyota, která první 3 roky používání nebo do vyčerpání kreditu 15000 USD proplácí náklady na nákup vodíku [81].

Elektromobily jako regulátory přebytků a nedostatků přenosové soustavy

Existuje myšlenka, že by v budoucnu, kdy bude produkce elektřiny z obnovitelných zdrojů zaujímat velký podíl celkové produkce, mohly fungovat akumulátory elektromobilů jako jakési regulátory přebytků a nedostatků přenosové soustavy. Tyto výchyly budou vznikat v důsledku nevyzpytatelných dodávek elektřiny, které jsou právě pro produkci z obnovitelných zdrojů typické. Teoreticky by tak mohli při aktuálním přebytku energie vlastníci elektromobilů ze sítě odebírat energii za sníženou cenu, a naopak při nedostatku ji za výhodných podmínek prodávat zpět.

Rozdíly mezi způsobem používání a jízdní dynamikou

I když jde v případě Toyota Mirai a Tesly Model S 75 o vozy řadící se do stejné kategorie (luxusní střední třída), při porovnávání těchto dvou koncepcí je třeba brát v úvahu, že z hlediska způsobu používání mezi nimi existuje mnoho rozdílů. Tyto rozdíly mohou být pro zákazníka při výběru mezi těmito dvěma vozy klíčové.

Tabulka 7.1: Srovnání vybraných parametrů Toyota Mirai a Tesla Model S 75

	Toyota Mirai	Tesla Model S 75
Zrychlení 0-100 km/h	9,6 s	4,3 s
Dojezd	502 km	400 km
Čas doplnění energie	5 min (0-100%)	20 min (0-50%)
Poháněná kola	přední	zadní
Počet sedadel	4	5+2
Cena:	2,020 mil. Kč	2,407 mil. Kč

8. Vlastní zhodnocení

V této kapitole budou shrnuty poznatky, které jsem při studiu hybridních pohonů získal, a bude prezentován také můj osobní předpoklad dalšího směřování trhu s osobními automobily obecně.

Již v tuto chvíli lze pozorovat rychlý růst podílu HEV mezi celkovými prodeji všech typů automobilů a zatím není důvod, proč by měl tento trend nějakým způsobem slábnout. Například mezi léty 2016 a 2017 došlo v Evropě k nárustu prodeje plug-in hybridních vozidel o 33,5% [82]. Podle statistiky prodeje plug-in vozidel, kterou udržuje švédský server ev-volumes.com, by do roku 2027 měly tyto vozy tvořit přibližně polovinu celkových prodeje všech typů vozidel [83].

Podobné předpoklady je však nutné přijímat s vysokou opatrností. Na vývoj trhu s automobily působí mnoho různých vlivů a vytváření zvláště dlouhodobých odhadů o jeho dalším směřování je velmi těžký, až nemožný úkol. Těmito vlivy jsou myšleny například různé regulace ze strany států v podobě emisních norem nebo emisních zón ve městech. Příkladem nepředvídatelnosti trhu může být také zájem o vznětové motory, jejichž podíl mezi všemi prodanými automobily mezi lety 2011 a 2017 klesnul z 55,7% na 44,4% [84], přičemž se tento úpadek výrazně zrychlil po skandálu automobilky Volkswagen zvaném „dieseldgate“. Vývoj trhu jistě ovlivní také řada nedořešených překážek, které stojí v cestě masovému rozšíření plug-in vozidel, z nichž některé byly zmíněny v úvodu kapitoly 4. Nutné je počítat také s možností objevu nových technologií či zdokonalení těch stávajících, což by mělo na výsledné prodeje také určitý vliv.

Tlak na vývoj a prosazení alternativních pohonů je však zřejmý a já věřím, že hybridní vozy budou mít po boku elektromobilů při tomto procesu velký význam. Spojení spalovacího motoru a elektromotoru v paralelním uspořádání komerčně funguje více než 20 let a sériové uspořádání je již také považováno za osvědčenou technologii. Nicméně zůstává otázkou, jestli někdy dojde k prosazení i jiného typu hybridního systému. Aktuálně je na trhu k dostání pouze několik zástupců kategorie hybridních vozidel s palivovým článkem a elektromotorem a já si myslím, že právě tato koncepce má ze všech typů hybridních systémů prezentovaných v kapitole 3 největší šanci na prosazení. Možnému vstupu na trh některé z ostatních koncepcí hybridního pohonu v tuto chvíli nic nenasvědčuje, i když například hybridy na principu ukládání energie do plynu pod tlakem (kapitola 3.3.2) nebo hybridy s elektrickým setrvačником (kapitola 3.2.2) jsou v malé míře zastoupené ve fletových vozidlech určitých firem.

Co se týče vozidel na vodík s palivovým článkem a elektromotorem, jejich produkce a eventuální prosazení na trhu je možné, ale musí být nejprve splněny tři hlavní předpoklady. Prvním z nich je nalezení cenově přijatelného způsobu výroby vodíku, který by navíc co nejméně zatěžoval životní prostředí. V tomto směru se do budoucna počítá hlavně s výrobou vodíku metodou termochemického rozkladu vody (kapitola 6.2), který by mohl probíhat v plánovaných jaderných reaktorech IV. generace. Osobně mě zaujala také myšlenka výroby vodíku na tzv. „vodíkových farmách“. Jde o odlehlá zařízení, na kterých by se vodík mohl vyrábět buď pomocí elektrosyntézy, elektrickou energií získanou z obnovitelných zdrojů, či metodou fotoelektrochemického rozkladu vody (kapitola 6.2).

V zájmu použitelnosti hybridů s palivovým článkem a elektromotorem je nutné vytvoření dostatečně husté infrastruktury, která by zajišťovala distribuci vodíku. Tím je myšleno nejen budování čerpacích stanic, ale také posílení distribuční soustavy samot-

ného vodíku (kapitola 6.4). V tomto ohledu je nejdále Japonsko a v budoucnu bude velmi zajímavé sledovat, jak se podaří budovat tamní vodíkové hospodářství.

Posledním předpokladem prosazení hybridů s palivovým článkem a elektromotorem je vyvinutí levnější technologie výroby palivových článků. Výroba aktuálně používaných PEMFC článků je totiž velmi nákladná kvůli vysoké ceně platiny, která funguje jako katalyzátor na elektrodách článku. Snížení množství použité platiny, či vzácných kovů obecně je aktuálně největší výzvou pro vědce pracující na vývoji palivových článků. Alternativou by mohlo být použití jiného typu palivového článku (kapitola 5.4), ale PEMFC článek je zatím stále nejvýhodnější.

9. Závěr

Cílem práce bylo vytvořit přehled všech existujících i teoreticky možných způsobů hybridního pohonu a zhodnocení jednotlivých konstrukcí. Záhy jsem však zjistil, že hybridní pohon je téma velmi rozsáhlé a kdybych se snažil věnovat všem koncepcím vyváženou měrou, tak bych žádnou z nich neprostudoval do hloubky. Proto jsem se rozhodl ve zbytku práce věnovat pouze vozidlům s palivovými články (FCV).

I tak by však bylo možné tuto část doplnit o rozbor několika problémů. Možnosti pohonu osobních vozidel palivovými články jsou shrnuty dostatečně, ale nejspíš by se hodilo shrnout možnosti této technologie fungovat i v jiných aplikacích, jako jsou například nákladní a užitková vozidla, sportovně orientované vozy nebo motocykly.

Dalo by se říci, že při zpracovávání částí o palivových člancích a o nakládání s vodíkem samotným jsem věnoval jen minimum prostoru otázce bezpečnosti, protože tyto technologie jsou již ověřené a jejich aplikace uskutečnitelná. Dodržení bezpečnosti je však nejdůležitější stránkou při navrhování jakékoliv technologie a významně ovlivňuje možnosti výsledného řešení. I z tohoto důvodu by se vyplatilo udělat alespoň stručný rozbor této problematiky.

V kapitole 7.0.2 je zmíněná myšlenka, že při prodeji aktuálně nabízených FCV automobilky nejspíše ztrácejí peníze. O jak vysoké částky se přibližně jedná pochopitelně nelze dohledat, ale pro posuzování budoucí využitelnosti a konkurenceschopnosti této technologie by to mohla být velmi důležitá informace. Největší vliv na cenu FCV má výrobní cena palivového článku a určitě by nebylo od věci, se alespoň pokusit odhadnout, kolik výroba moderního článku s polymerní membránou stojí.

Myslím si, že by se společnost měla snažit o přechod ke stavu, kdy bude jen minimálně využívat neobnovitelných zdrojů. Takový stav je v každém případě nevyhnutelný a čím dříve se nám podaří k němu přiblížit, tím méně lidstvo poznamenají následky tlaků vzniklých nedostatkem těchto zdrojů. Věřím, že hybridní pohony budou mít při tomto procesu důležitou roli.

Literatura

- [1] *ANALYSIS: Volvo Flybrid KERS technology* [online]. just-auto, 2014 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: just-auto.com/analysis/volvo-flybrid-kers-technology_id145785.aspx
- [2] CARTER, J. *GKN takes hybrid technology from the race track to the bus stop* [online]. Engineers Ireland, 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: engineersjournal.ie/2015/05/05/gyrodrive-hybrid-technology-bus/
- [3] *Hybrid Air: An innovative full-hybrid petrol solution for the car of the future* [online]. Groupe PSA, 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: groupe-psa.com/en/newsroom/automotive-innovation/hybrid-air/
- [4] BUREŠ, D. *Šéf Peugeotu: Hybrid Air funguje, problémem je legislativa* [online]. CZECH NEWS CENTER, 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: auto.cz/sef-peugeotu-hybrid-air-funguje-problemem-legislativa-89156
- [5] CROWE, P. *40 Hydraulic Hybrid Vehicles to UPS' Fleet* [online]. Kanada: VerticalScope, 2012 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: hybridcars.com/40-hydraulic-hybrid-vehicles-ups-fleet-53563/
- [6] *Toyota sells 1.52 million electrified vehicles in 2017, three years ahead of 2020 target* [online]. Toyota, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/20966057.html?adid=ag478_mail&padid=ag478_mail
- [7] *China Plug-in Sales for 2017-Q4 and Full Year – Update* [online]. EV-volumes, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: ev-volumes.com/country/china/
- [8] *Monthly plug-in vehicle sales* [online]. In: . EV-volumes, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: ev-volumes.com/wp-content/uploads/2018/05/WW-A-3-2018.png
- [9] KOPERA, J. *Inside the Nickel Metal Hydride Battery* [pdf]. Cobasys, 2004 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: web.archive.org/web/20090227062546/http://www.cobasys.com/pdf/tutorial/inside_nimh_battery_technology.pdf
- [10] SHAHAN, Z. *Electric Car Evolution* [online]. Sustainable Enterprises Media, 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: cleantechnica.com/2015/04/26/electric-car-history/
- [11] *AC Induction Motors vs. Permanent Magnet Synchronous Motors* [online]. Empowering Pumps, 2017 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: empoweringpumps.com/ac-induction-motors-versus-permanent-magnet-synchronous-motors-fuji/
- [12] BAKKER, S. *Tesla Model 3 Motor — Everything I've Been Able To Learn About It* [online]. Sustainable Enterprises Media, 2017 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: cleantechnica.com/2018/03/11/tesla-model-3-motor-in-depth/
- [13] *ISO/TS 15869: Gaseous hydrogen and hydrogen blends — Land vehicle fuel tanks*. 1. vyd. 2009.

LITERATURA

- [14] *Outline of the Mirai* [online]. In: . Toyota, [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf
- [15] DLOUHÝ, P. a L. JANÍK. *Skladování vodíku I* [online]. 2007 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i
- [16] *Toyota Mirai review: 2015 first drive* [online]. Motoring Research, 2007 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: motoringresearch.com/car-reviews/toyota-mirai-review-2015-first-drive/
- [17] *FCV Fuel Cell Vehicle* [online]. In: . Toyota [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/
- [18] GROVE, W. R. *Mr. W. R. Grove on a new Voltaic Combination*. Philosophical Magazine and Journal of Science. 1838, (60).
- [19] SCHÖNBEIN, C. F. *On the Voltaic Polarization of Certain Solid and Fluid Substances*. Philosophical Magazine and Journal of Science. 1839, (14).
- [20] GROVE, W. R. *On a Gaseous Voltaic Battery*. Philosophical Magazine and Journal of Science. 1942, 21(140), 417-420. DOI: 10.1080/14786444208621600.
- [21] *PEM Fuel Cells* [online]. Smithsonian Institution [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: americanhistory.si.edu/fuelcells/pem/pemmain.htm
- [22] *Francis Thomas (Tom) Bacon* [online]. [online]. Kingston Technical Software [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: corrosion-doctors.org/Biographies/BaconBio.htm
- [23] HADHAZY, A. *Space-age technology helps drive automobiles* [online]. NBC News, 2011 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: nbcnews.com/id/41201174/ns/technology_and_science-tech_and_gadgets/t/space-age-technology-helps-drive-future-automobiles/#.WwGh1B6saM8
- [24] *1966 GM Electrovan* [online]. Hydrogen Cars Now [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: hydrogencarsnow.com/index.php/gm-electrovan/
- [25] BARLETT, D. L. a J. B. STEELE. *Hydrogen Is in His Dreams* [online]. Time, 2003 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: content.time.com/time/magazine/article/0,9171,464641,00.html
- [26] SIROSH, N. *Hydrogen Composite Tank Program* [pdf]. U.S. Department of Energy, 2002 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/32405b27.pdf
- [27] NICE, K. a J. STRICKLAND. *How Fuel Cells Work* [online]. HowStuffWorks, 2000 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/alternative-fuels/fuel-cell2.htm

- [28] WANG, J. *Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: U-type arrangement* [online]. 2008, 33(21), 6339-6350 [cit. 2018-05-20]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.020
- [29] HART, D. *FCV Fuel Cell Vehicle* [online]. In: . E4Tech, 2014 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: e-sources.com/fuelcell-intro.htm
- [30] *AFC* [online]. Johnson Matthey [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: fuelcelltoday.com/technologies/afc
- [31] GARCHE, J., et. al.: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* Newnes, 2013, s. 349-350 [cit. 2018-05-20]. ISBN 0444527451, 9780444527455.
- [32] TRAPP, R. *The green black cab hits the road* [online]. Independent, 1998 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: independent.co.uk/news/business/the-green-black-cab-hits-the-road-1164883.html
- [33] LEE, J; et. al. *Polymer electrolyte membranes for fuel cells* [pdf]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2006, (12), 175-183 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: cheric.org/PDF/JIEC/IE12/IE12-2-0175.pdf
- [34] OWEJAN, J. P.; et. al. *Water management studies in PEM fuel cells: Fuel cell design and in situ water distributions* [pdf]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(8), 3436-3444 [cit. 2018-05-20]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.100
- [35] ZHANG, J.; et. al. *High temperature PEM fuel cells* [pdf]. Journal of Power Sources, 2006, 160(2), 872-891 [cit. 2018-05-20]. ISSN 0378-7753. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.034
- [36] ČÁPOVÁ, B. *S profesorem Vladimírem Matolínem o výzkumu vodíkového pohonu na MFF Univerzity Karlovy* [online]. E.ON, 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: ecofuture.cz/clanek/s-profesorem-vladimirem-matolinem-o-vyzkumu-vodikoveho-pohonu-na-mff-univerzity
- [37] *Types of Fuel Cells* [online]. U.S. Department of Energy [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells#phosphoric
- [38] *Fuel Cell Handbook* [pdf]. 7. EG&G Technical Services, 2004, s. 145-148 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: web.archive.org/web/20101123023857/http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/pubs/fchandbook7.pdf
- [39] *PAFC* [online]. Johnson Matthey [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: fuelcelltoday.com/technologies/pafc
- [40] *Fuel Cells* [online]. Johnson Matthey [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: web.archive.org/web/20101123204231/http://energycenter.org/index.php/technical-assistance/renewables/fuel-cells
- [41] *MCFC* [online]. Johnson Matthey [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: fuelcelltoday.com/technologies/mcfc

LITERATURA

- [42] *Types of Fuel Cells* [online]. U.S. Department of Energy [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells#molten
- [43] SAMMES, N. a Y. DU. *Fuel Cell Technologies: State and Perspectives: Intermediate-Temperature SOFC Electrolytes* [online]. 202. Springer, Dordrecht, 2005 [cit. 2018-05-20]. ISBN 978-1-4020-3498-5. Dostupné z: link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3498-9_3
- [44] *SOFC* [online]. In: . Johnson Matthey [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: fuelcelltoday.com/technologies/sofc
- [45] *Redox Cube Datasheet* [pdf]. Redox [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: redoxenergy.com/docs/Redox%20Cube%20Datasheet.pdf
- [46] *Toyota Mirai Specifications* [online]. Pacific New Media, 2014 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: mytoyotamirai.com/toyota-mirai-specifications/
- [47] GAO, Z.; et. al. *A perspective on low-temperature solid oxide fuel cells*. Energy & Environmental Science [online]. 2016, (5), 1602-1644 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1039/C5EE03858H. Dostupné z: pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ee/c5ee03858h#!divAbstract
- [48] REEVE, N. *Nissan unveils world's first Solid-Oxide Fuel Cell vehicle*. [online]. Nissan, 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: nissannews.com/en-US/nissan/usa/channels/us-united-states-nissan/releases/nissan-unveils-world-s-first-solid-oxide-fuel-cell-vehicle
- [49] *DMFC* [online]. Johnson Matthey [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: fuelcelltoday.com/technologies/dmfc
- [50] HOGARTH, M. P. *Direct Methanol Fuel Cells: Technological Advances and Further Requirements*. Platinum Metals Rev. [pdf]. 1996, 40(4), 150-159 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: technology.matthey.com/pdf/pmr-v40-i4-150-159.pdf
- [51] KANELLOS, M. *Nissan Adopts Fuel Cells in Factories, Will Big Rigs Be Next?* [online]. Greentech Media, 2009 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: greentechmedia.com/articles/read/nissan-adopts-fuel-cell-forklifts-will-big-rigs-be-next#gs.cLKaC8Y
- [52] *Mobility* [online]. Serenergy [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: serenergy.com/applications-and-solutions/mobility/
- [53] GULARI, E. a C. J. BROWN. *CATALYTIC PRODUCTION OF HYDROGEN GAS BY METHANOL REFORMING*. Fuel Chemistry Division Preprints [pdf]. 2002, 47(2) [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/47_2_Boston_10-02_0201.pdf
- [54] PAVLŮSEK, O. *Hyundai Nexo je ohlášeným nástupcem vodíkového ix35 Fuel Cell*. [online]. CZECH NEWS CENTER, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: auto.cz/hyundai-nexo-ohlasenym-nastupcem-vodikoveho-ix35-fuel-cell-112469

- [55] VOELCKER, J. *Nissan takes a different approach to fuel cells: ethanol*. [online]. Green Car Reports, 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: greencarreports.com/news/1104467_nissan-takes-a-different-approach-to-fuel-cells-ethanol
- [56] ROMAN, J.; et. al. *Introduction to hydrogen Technology*. John Wiley, 2008. ISBN 978-0-471-77985-8.
- [57] *A green, safe, efficient and inexpensive hydrogen production system that operates at room temperature in air*. [online]. In: . Innovation Toronto, 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: innovationtoronto.com/2016/12/a-green-safe-efficient-and-inexpensive-hydrogen-production-system-that-operate
- [58] BIČÁKOVÁ, O. *Možnosti výroby vodíku biologickými procesy*. Paliva 2 [pdf]. 2010, , 103-112 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: paliva.vscht.cz/download.php?id=29
- [59] MILLER, E. a R. ROCHELEAU. *Photoelectrochemical hydrogen production*. [pdf]. U.S. Department of Energy [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: pdfs.semanticscholar.org/0315/f948abccefc42c4ff6672da142941db4f8d9.pdf
- [60] *Hydrogen Production: Electrolysis*. [online]. U.S. Department of Energy [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis
- [61] WAGNER, V. *Reaktory IV generace*. [online]. Osel, 2008 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: osel.cz/3568-reaktory-iv-generace.html
- [62] *Technology Systems*. [online]. Generation IV International Forum [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: gen-4.org/gif/jcms/c_40486/technology-systems
- [63] *Australia to export liquefied hydrogen to Japan in world-first project* [online]. Sydney: JAPAN TIMES, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: gen-4.org/gif/jcms/c_40486/technology-systems
- [64] GILLETTE, J. L. a R. L. KOLPA. *Overview of Interstate Hydrogen Pipeline Systems* [pdf]. Argonne, s. 2-4 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: corridoreis.anl.gov/documents/docs/technical/APT_61012_EVS_TM_08_2.pdf
- [65] *Hydrogen Pipelines* [online]. U.S. Department of Energy [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines
- [66] *Germany had the highest increase of hydrogen refuelling stations worldwide in 2017* [online]. FuelCellsWorks, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: fuelcellworks.com/news/germany-had-the-highest-increase-of-hydrogen-refuelling-stations-worldwide-in-
- [67] GREIMEL, H. *Japan group's goal: 'Hydrogen society'* [online]. Crain Communications, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: autonews.com/article/20180319/MOBILITY/180319876/japan-hydrogen-society-fueling-stations
- [68] KANE, M. *European Sales Of Toyota Mirai To Begin This September* [online]. Motorsport Network, 2015 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: insideevs.com/european-sales-toyota-mirai-begin-september/

LITERATURA

- [69] DVOŘÁK, F. *Prahu brázdí auto na vodík, ale nemá kde tankovat* [online]. MAFRA, 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: auto.idnes.cz/toyota-mirai-vodik-0ag-/automoto.aspx?c=A170710_180415_automoto_fdv
- [70] *Compare Fuel Cell Vehicles* [online]. U.S. Department of Energy [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: fueleconomy.gov/feg/fcv_sbs.shtml
- [71] *MY 2018 MIRAI OWNER EXPERIENCE* [online]. Toyota Motor Sales [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: ssl.toyota.com/mirai/ownership-experience.html
- [72] *2016 Toyota Mirai: "Do Not Refuel After 2029"?* [online]. Motorsport Network [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: insideevs.com/2016-toyota-mirai-refuel-2029/
- [73] *Kolik stojí 1 kWh?* [online]. Srovnání cen elektřiny a plynu online [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/
- [74] *Model S: Battery & Charging: Home Charging Efficiency* [online]. Tesla Motors Club, 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: teslamotorsclub.com/tmc/threads/home-charging-efficiency.73181/
- [75] ŠLIK, J. *Tesla zveřejnila, kolik bude stát nabíjení přes Superchargery* [online]. oXy Online, 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: svetmobilne.cz/tesla-priblizila-kolik-bude-stat-nabijeni-pres-superchargery/4904
- [76] *Nová dotační výzva na podporu elektromobility pro podnikatele mění podmínky* [online]. Chamanne, 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: hybrid.cz/v-poradi-3-dotacni-vyzva-na-podporu-elektromobility-pro-podnikatele-prinesla-zmenu-
- [77] *Belgium and the Netherlands: MaxRange* [online]. In: . Tesla Motors Club, 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: teslamotorsclub.com/tmc/attachments/stats-png.233851/
- [78] OHNSMAN, A. *Toyota Says It's Now Turning a Profit on the Hybrid Prius* [online]. Los Angeles Times, 2001 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: articles.latimes.com/2001/dec/19/autos/hy-prius19
- [79] VOELCKER, J. *How Much Money Does The 2016 Toyota Mirai Lose? A Lot, Perhaps* [online]. Internet Brands, 2014 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: greencarreports.com/news/1095773_how-much-money-does-the-2016-toyota-mirai-lose-a-lot-perhaps
- [80] *Referral Program* [online]. Tesla [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: tesla.com/en_EU/support/referral-program?redirect=no
- [81] *Disclosures* [online]. Tesla [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: ssl.toyota.com/mirai/terms.html#item24
- [82] BEKKER, H. *2017 (Full Year) Europe: Electric and Hybrid Car Sales per EU and EFTA Country* [online]. Impressum, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: best-selling-cars.com/europe/2017-full-year-europe-electric-hybrid-vehicle-sales-per-eu-efta-country/

- [83] *Global Plug-in Sales for Q1-2018* [online]. EV-volumes, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/
- [84] *Share of Diesel in New Passenger Cars* [online]. ACEA [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: acea.be/statistics/tag/category/share-of-diesel-in-new-passenger-cars

10. Seznam použitých zkratek a symbolů

AFC	„alkaline fuel cell“, alkalický palivový článek
CVT	„continuously variable transmission“, variátor
DMFC	„direct methanol fuel cell“, článek s přímým methanolem
EV	„electric vehicle“, elektromobil
FCEV	„fuel cell electric vehicle“, vozidlo s palivovými články
FCV	„fuel cell vehicle“, vozidlo s palivovými články
HEV	„hybrid electric vehicle“, hybridní vozidlo s elektromotorem
HHV	„hydraulic hybrid vehicle“, hybridní vozidlo s ukládáním energie do plynu pod tlakem
KERS	„kinetic energy recovery system“, systém rekuperace
LPG	„liquified petroleum gas“, zkapalněný ropný plyn
MCFC	„molten carbonate fuel cell“, článek s tavenými uhličitany
PČ	palivový článek
PEM	„proton exchange membrane“, polymerní membrána
PEMFC	„proton exchange membrane fuel cell“, palivový článek s polymerní membránou
SOFC	„solid oxide fuel cell“, palivový článek s tuhými oxidy
ZEV	„zero emission vehicle“, bezemisní vozidlo
G [kJ / mol]	Gibbsova volná energie
H [kJ / mol]	entalpie
J [A / cm ²]	proudová hustota
P [W / cm ²]	výkonová hustota
U [V]	napětí
W [J]	energie
η [-]	účinnost
η_{max} [-]	termodynamická účinnost

10. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

η_V [-]	napěťová účinnost
ρ_m [kg(H ₂) / kg]	hmotnostní kapacita
ρ_V [kg(H ₂) / m ³]	objemová kapacita