



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## NÍZKOTEPLTNÍ PALIVOVÝ ČLÁNEK PRO ULTRALEHKÝ LETOUN

LOW TEMPERATURE FUEL CELL FOR ULTRA-LIGHT-PLANE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUKÁŠ HLADIŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.

BRNO 2013



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Hladiš

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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 diplomové práce:

### **Nízkoteplotní palivový článek pro ultralehký letoun**

v anglickém jazyce:

### **Low temperature fuel cell for ultra-light-plane**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou nasazení palivových článků v pohonech ultralehkých letounů. Práce bude konkrétně orientována na návrh pohonné jednotky a zajištění dostatečného množství paliva pro letoun Merlin. Pozornost bude věnována technickému řešení pohonné jednotky využívající PČ, konstrukci vlastního palivového článku a potřebným nádržím zajišťujícím dostatečné množství paliva pro požadovaný provoz letounu.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracujte přehled palivových článků a používaných paliv.
2. Navrhněte pohonou jednotku s palivovým článkem vhodnou pro letoun Merlin.
3. Zpracujte konstrukční návrh palivového článku zohledňující požadavky letounu, včetně výkresové dokumentace.
4. Navrhněte vhodné palivové nádrže pro letoun Merlin.

Seznam odborné literatury:

Kazda Tomáš, Nízkoteplotní vodíkové palivové články, 2009

Kamrla David, Studium vodíkových palivových článků, 2009

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá, návrhem pohonu ultra-lehkého letounu s využitím technologie palivových článků. Jsou zde popsány jednotlivé druhy palivových článků a možných paliv. Dále je zde uveden výpočet nízkoteplotního palivového článku  $H_2 - O_2$  s polymerní membránou (PEM). Součástí jsou rovněž konstrukční výkresy navrhovaného řešení.

## **KLÍČOVÉ SLOVA**

Palivový článek, vodík, palivo, elektrolyt, anoda, katoda

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the concept of propulsion for ultralight plane with using fuel cells technology. Here are described the individual kinds of fuel cells and possible fuel. Furthermore it is listed the calculation of low-temperature fuel cell  $H_2 - O_2$  with polymeric membrane (PEM). The thesis includes also a part with the design drawings of the proposed solutions.

## **KEYWORDS**

Fuel cell, hydrogen, fuel, electrolyte, anode, cathode



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HLADIŠ, L. *Nizkoteplotní palivový článek pro ultralehký letoun*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..





## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci na téma: „**Nízkoteplotní palivový článek pro ultralehký letoun**“ jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

V Brně dne 24.5.2013

.....  
*Podpis*



## **PODĚKOVÁNÍ:**

Rád bych poděkoval vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. za cílené vedení v průběhu vypracování diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Martinovi Kotačkovi za námět diplomové práce a rady při konstrukčním řešení problému.



# OBSAH

1	ÚVOD .....	14
2	PALIVOVÝ ČLÁNEK .....	15
2.1	Princip palivového článku .....	15
2.2	Výhody palivového článku [4] .....	17
2.3	Nevýhody palivového článku [4] .....	17
2.4	Elektrody .....	18
2.5	Elektrolyt .....	18
2.6	Palivo .....	19
2.6.1	Výroba vodíku .....	20
3	ROZDĚLENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ .....	21
3.1	Alkalické palivové články (AFC) [4] .....	23
3.2	Membránové články (články s tuhými polymery) (PEMFC) [4] .....	25
3.3	Palivové články s kyselinou fosforečnou $HPO_3$ (PAFC) [4] .....	27
3.4	Přímé methanolové články (DMFC) [4] .....	28
3.5	Palivový článek s roztavenými uhlíčitany (MCFC) [4] .....	32
3.6	Palivový článek s pevnými oxidy (SOFC) [4] .....	34
3.7	Souhrn parametrů palivových článků [4] .....	36
4	SPECIFIKACE LETOUNU MERLIN 100 UL .....	37
4.1	Popis letounu Merlin 100 UL [12] .....	37
4.2	Rozměry letounu Merlin 100 UL [12] .....	39
4.3	Požadavky na pohonnou jednotku s palivovým článkem .....	40
5	NÁVRH PALIVOVÉHO ČLÁNKU PRO POHON LETOUNU MERLIN 100 UL .....	41
5.1	Proč jsem zvolil palivový článek typu PEM: .....	41
5.2	Výpočet palivového článku typu PEM $H_2 - O_2$ : .....	42
5.2.1	Výpočet napětí palivového článku PEM $H_2 - O_2$ .....	43

5.2.2	Celkové napětí palivového článku .....	48
5.2.3	Výpočet výkonu palivového článku .....	48
5.2.4	Výstupní proud ze všech 4 bloků palivových článků.....	49
5.2.5	Výstupní napětí ze všech 4 bloků palivových článků .....	49
5.2.6	Výpočet spotřeby paliva (H <sub>2</sub> ) při maximálním výkonu článku.....	49
6	PŘESTAVBA POHONU LETOUNU MERLIN 100 UL .....	51
6.1	Schéma pohonné jednotky letadla .....	51
6.2	Přívod paliva z palivového článku.....	51
6.3	Palivový článek.....	52
6.4	Měnič (DC / DC měnič) .....	53
6.5	Motor .....	54
7	NÁVRH VHODNÝCH PALIVOVÝCH NÁDRŽÍ PRO LETOUN MERLIN 100 UL .....	56
7.1	Skladování vodíku .....	56
7.1.1	Skladování vodíku v plynném skupenství.....	56
7.1.2	Skladování vodíku v kapalném skupenství .....	56
7.1.3	Skladování vodíku v hydridech kovů.....	56
7.2	Proč jsem zvolil uskladnění vodíku v metalhydridových zásobnících.....	57
8	ZÁVĚR.....	58
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59
10	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK .....	62
11	SEZNAM PŘÍLOH .....	65



## 1 ÚVOD

Princip palivového článku byl zjištěn už v roce 1838 švýcarským chemikem Christianem Friedrich Schönbeinem. Na základě jeho studie složil funkční prototyp sir William Grove. Později jej začla používat NASA jako zdroj elektrické energie, tepla a pitné vody pro vesmírné lety programu Apollo.

Palivové články představují čistou technologii výroby elektrické energie s vysokou účinností. Jsou alternativou k současným malým a středním zdrojům na fosilní paliva, plynovým motorům, plynovým mikroturbínám, malým kogeneračním jednotkám, počítá se s jejich nasazením v automobilovém průmyslu. V budoucnu by měly nahradit i větší elektrárenské zdroje. Uplatnění naleznou též jako náhrada za baterie a akumulátory.

Nevětší naděje se vkládají do nízkoteplotního, kyslíkovodíkového palivového článku s polymerní membránou.

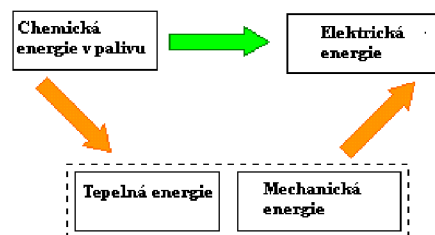
Vyšší dostupnosti a určité nadčasovosti palivových článků chci využít i v této práci při tvorbě konceptu návrhu systému s využitím palivových článků, jako napájecí jednotky pro pohon ultra-lehkého letounu.

Projekt návrhu pohonu vznikl na popud firmy, jenž se zabývá konstrukcí malých letadel. Cílem mojí práce je sestavit technickou zprávu možného řešení pohonu letounu a výpočet palivového článku. Budu se věnovat použitelným druhům paliv, představím palivový článek a rozeberu jednotlivé typy. Hlavní náplní bude i návrh systému pohonu jako celku.

## 2 PALIVOVÝ ČLÁNEK

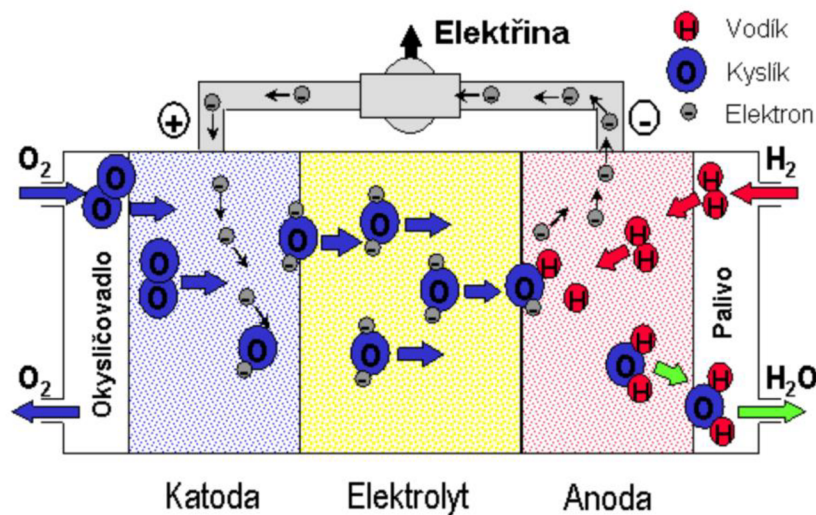
### 2.1 Princip palivového článku

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo v elektrickou energii (obr. 2.1). Skládá se z porézních elektrod (katoda, anoda) oddělených elektrolytem. V oblasti pórů elektrod vzniká třífázové rozhraní – elektroda, elektrolyt a reagenty vzniklé oxidací paliva a redukcí okysličovadla. [1]



Obr. 2.1 Transformace energie [2]

Základní princip transformace energie je pro všechny palivové články stejný, jednotlivé typy se však liší materiálem elektrod, použitým elektrolytem a pracovní teplotou i konkrétními chemickými reakcemi na anodě a katodě. Princip funkce palivového článku, děj v principu inverzní k elektrolyze, jak je patrný z (obr. 2.2), je zde vysvětlen pro vysokoteplotní palivový článek s pevným oxidickým elektrolytem, jako palivo a okysličovadlo uvažujeme čistý vodík a kyslík. [1]



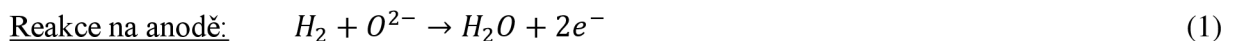
Obr. 2.2 Princip činnosti palivového článku [2]



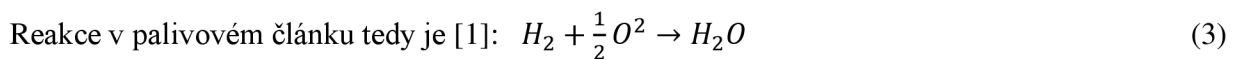
---

Termínem katoda se v elektrotechnice označuje záporná elektroda, ale v chemii se takto označuje elektroda, na níž probíhá redukční reakce – slučování prvku s elektrony. Anoda se z elektrického hlediska nazývá kladná elektroda, v chemii je to elektroda na níž probíhá oxidační reakce – odtrhávání elektronů prvku. [1]

V místě třífázového rozhraní dochází k elektrochemické oxidaci paliva a redukci okysličovadla podle následujících rovnic [1]:



Molekulární kyslík je přiváděn na katodu palivového článku, kde se dvěma elektrony redukuje na kyslíkový anion, který je transportován elektrolytem k anodě. Na anodě se přiváděný vodík redukuje kyslíkovým aniontem za vzniku vody, přičemž uvolněné elektrony jsou z anody vedeny na katodu jako využitelný elektrický proud. [1]



Reakce se účastní 2 elektrony. Pro jiná paliva může být počet elektronů odlišný. [3]

U nízkoteplotních palivových článků je potřeba k uskutečnění oxidační a redukční reakce katalyzátory, které jsou tvořeny vzácnými kovy (platina, palladium). Katalyzátory nejsou podmínkou některých vysokoteplotních článků, protože energie dodaná množstvím tepla obvykle k uskutečnění příslušné reakce postačuje. [3]

Palivem může být látka jak kapalná, tak i plynná. Okysličovadlem je však téměř vždy plyn. Záporná elektroda musí být uzpůsobena skupenství přiváděného paliva. Pokud je palivem plyn, musí na ní být co nejvíce míst, kde se setkává fáze pevná (elektroda s katalyzátorem), kapalná (elektrolyt) a plynná (palivo). [4]

## 2.2 Výhody palivového článku [4]

K výhodám palivových článků patří jistě:

- vysoká životnost (výrobci udávají desetitisíc hodin)
- nepřítomnost pohyblivých částí, tichý chod
- schopnost snášet značná přetížení (550 % po několik minut a 800% přetížení po dobu několika sekund), vynikající dynamická odezva
- lze je využít pro kombinované systémy ohřevu a výroby elektřiny
- modulární koncepce

## 2.3 Nevýhody palivového článku [4]

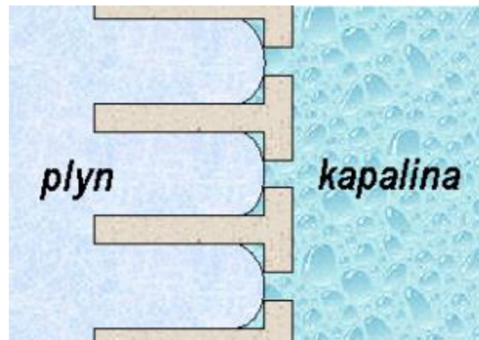
Nevýhody palivových článků vycházejí ze skutečnosti, že mohou pracovat v dlouhodobém nepřetržitém provozu. Jde především o:

- vodík je velmi reaktivní prvek → problémy s bezpečností
  - nutnost kontinuálně odstraňovat zplodiny chemických reakcí, jejichž množství závisí na velikosti odebíraného proudu (u článku na bázi  $H_2 - O_2$  jde o odčerpávání vody, u jiných článků jde o jiné produkty oxidace)
  - udržení optimální teploty a tlaku aktivních médií (použití výměníků tepla u článků s elektrolytem s  $KOH$ )
  - velké investiční náklady
  - uvedení baterie do provozu – trvá několik minut a baterie se během této doby ohřívá, a to přímo – dodávaným proudem nebo teplem z vnějšího zdroje
-

## 2.4 Elektrody

Funkcí elektrody je vyvolat reakci mezi reaktanty (palivo a okysličovadlo) a elektrolytem, aniž by se sama účastnila reakce nebo korodovala. Musí být též elektrickým vodičem, a umožnit kontakt tří fází (plynné reaktanty, kapalný elektrolyt a pevná elektroda). [1]

Existuje několik metod stabilizace rozhraní kapalina-plyn a všechny jsou založeny na kapilárním efektu. Pórovitá elektroda umožňuje kapalně vzlínat malými póry, zatímco tlak plynu jí nedovoluje vnikat do větších pórů (obr. 2.3). Slučování dvou fází může být dosaženo několika způsoby. Elektrolyt má tendenci vytvořit tenký smáčivý film na vnitřním povrchu elektrody. Reagující plyn, obtížně rozpustný v elektrolytu, může difundovat skrz tento film a dosáhnout povrchu elektrody, kde dochází k reakci kapaliny a plynu. Struktura elektrody musí být vytvořena tak, aby maximalizovala plochu smáčivého filmu. [1]



Obr. 2.3 Schematický řez pórovitou elektrodou [1]

## 2.5 Elektrolyt

Palivové články typu PEM používají jako elektrolyt polymerní membránu. Elektrolyt tvoří tenká membrána z plastového filmu, jejíž tloušťka se pohybuje obvykle v rozmezí od 50 do 175  $\mu\text{m}$ . [3]

Polymerní membrána je vysoce plněný polymerní kompozit, složený z velmi jemně mletých polymerních částic s iontově-selektivními funkčními skupinami. Polymerní membrány pro správnou činnost vyžadují přítomnost vody, která zajišťuje iontovou vodivost. Vodíkové ionty se pohybují společně s molekulami vody v průběhu výměnné iontové reakce. [3]

## 2.6 Palivo

Zatím nejčastěji používaným palivem je čistý vodík, který může v palivovém článku přímo reagovat za vývoje elektrického proudu. Protože vodík není vhodným palivem pro všechny aplikace palivových článků, je věnována velká pozornost i tzv. nepřímým palivům, ze kterých je vodík uvolňován reformovacím procesem. Mezi nejvýznamnější nepřímé zdroje vodíku patří zemní plyn, methan, methanol, ethanol, případně čpavek. Reformováním těchto zdrojů vodní parou nebo tzv. parciální oxidací při vysokých teplotách vzniká vodík s oxidy uhlíku. [5]

Protože ve většině palivových článků jsou používány katalyzátory na bázi platiny, je zapotřebí po provedeném reformování odstranit s paliva (vodíku) CO, který způsobuje otravu těchto katalyzátorů. [1]

Za potenciální nepřímá paliva do palivových článků jsou považovány i současné kapalné pohonné hmoty do spalovacích motorů automobilů. V poslední době se pro řadu aplikací s využitím palivových článků ukazuje methanol jako velmi perspektivní kapalné přímé palivo. Již v současné době byla vyrobena řada prototypů palivových článků, ve kterých je používán methanol jako přímé palivo bez potřeby reformování. [5]

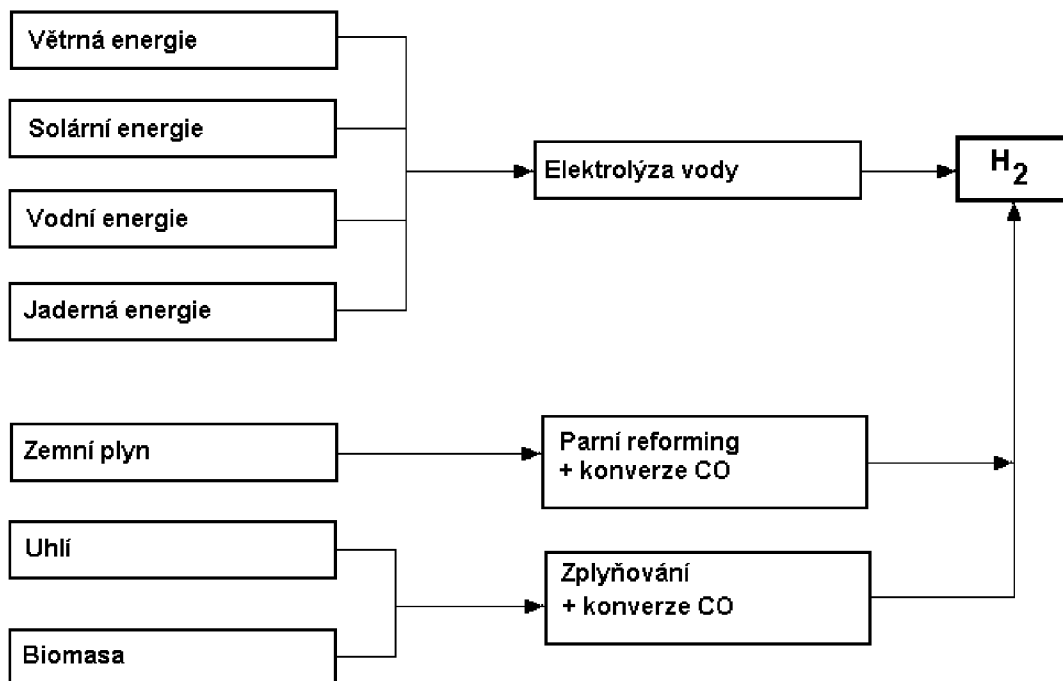
V této práci bude věnována pozornost pouze vodíkovému palivu.

### 2.6.1 Výroba vodíku

Vodík se v přírodě tvoří při rozkladu organických látek některými bakteriemi. Genetické inženýrství usiluje o zdokonalení tohoto procesu do míry průmyslově využitelné k produkci vodíku. [10]

Při průmyslové výrobě vodíku se nejvíce využívá metody zplyňování uhlí. Touto metodou se vyrobí 90% produkce vodíku. Za další perspektivní metody se považuje elektrolýza vody, termické štěpení vody a zplyňování biomasy, zvláště biomasy odpadní. [11]

Cena vodíku závisí na ceně zemního plynu, ale i na dodané tepelné energii. [11]



Obr. 2.4 Schéma odlišných postupů při výrobě vodíku [9]

---

### 3 ROZDĚLENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

V současné době existuje několik základních typů palivových článků, které se liší především druhem elektrolytu a provozní teplotou. Tím je dáno i odlišné konstrukční provedení, způsob provozu a přípravy paliva. [1]

Podle provozní teploty se palivové články dělí na [1]:

- nízkoteplotní  $60 \div 130$  °C
- středněteplotní  $160 \div 220$  °C
- vysokoteplotní  $600 \div 1050$  °C

Podle typu elektrolytu se palivové články dělí na články s [4]:

- alkalickým elektrolytem (AFC – Alkaline Fuel Cell) KOH (hydroxid draselný)
- polymerní elektrolytickou membránou (PEM – Polymer Electrolyte Membrane / Proton Exchange Membrane)
- kyselinou fosforečnou (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell)  $H_3PO_4$
- přímé metanolové DMFC (Direct Methanol Fuel Cells)
- taveninou alkalických uhličitánů (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell) keramika z  $LiAlO_2$  nasycená alkalickými uhličitany
- pevným oxidickým elektrolytem (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell) obvykle  $Y_2O_3$  nebo  $ZrO_2$

Z toho vyplývají i odlišné elektrochemické reakce v palivových článcích:

	<b>Reakce na anodě</b>	<b>Reakce na katodě</b>
<b>AFC</b>	$2\text{H}_2 + 4(\text{OH})^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH})^-$
<b>PEMFC</b>	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
<b>PAFC</b>	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
<b>DMFC</b>	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	$1\frac{1}{2}\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$
<b>MCFC</b>	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$
<b>SOFC</b>	$\text{H}_2 + \text{O}_2^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{O}_2^- \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CH}_4 + 4\text{O}_2^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 8\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2^-$

Tab. 3.1 Přehled elektrochemických reakcí [1] [4]

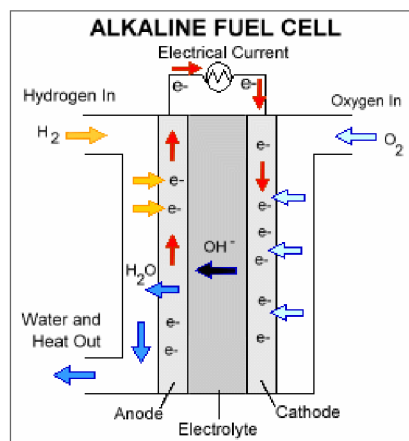
Rozdělení palivových článků na jednotlivé typy a přehled některých jejich základních odlišností je v následující tabulce:

	Provozní teplota [°C]	Palivo	Okysličovadlo
AFC	60 ÷ 100	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
PEMFC	20 ÷ 80	H <sub>2</sub> , methanol	O <sub>2</sub> ze vzduchu
PAFC	170 ÷ 250	H <sub>2</sub> , zemní plyn	O <sub>2</sub> ze vzduchu
DMFC	20 ÷ 130	methanol	O <sub>2</sub> ze vzduchu
MCFC	600 ÷ 650	H <sub>2</sub> , CO, zemní plyn	O <sub>2</sub> ze vzduchu
SOFC	600 ÷ 1050	H <sub>2</sub> , CO, zemní plyn	O <sub>2</sub> ze vzduchu

Tab. 3.2 Charakteristiky jednotlivých typů palivových článků [4]

### 3.1 Alkalické palivové články (AFC) [4]

Jedná se o článek nízkoteplotní (obr. 3.1) (rozsah pracovních teplot je 60 – 100 °C), musí být tudíž povrch elektrod pokryt silnou vrstvou platiny sloužící jako katalyzátor. Při styku vodíku s katalyzátorem dojde u povrchu protonové membrány k reakci, při které dochází k rozdělení molekul vodíku na kladné ionty  $H^+$  a záporné elektrony  $e^-$ . Toto je hlavní příčinou vysoké ceny těchto článků. Další nevýhodou je reakce hydroxidu draselného (KOH) přítomného v elektrolytu se vzdušným oxidem uhličitým ( $CO_2$ ), při které vzniká uhličitán draselný ( $K_2CO_3$ ). Tento nechtěný produkt postupně degraduje vlastnosti elektrolytu a také zanáší póry elektrod. Proto musí být jako oxidační činidlo přiváděn čistý kyslík. Provoz článku se tím samozřejmě dále prodražuje.



Obr. 3.1 Princip alkalického palivového článku AFC [6]

Při chemických reakcích v alkalickém článku s roztokem KOH jsou nejdůležitější složkou aniony  $OH^-$ , kterých je v roztoku nadbytek. S těmito anionty reaguje na anodě přiváděný vodík, a to podle rovnice:



Uvolněné elektrony putují vnějším obvodem ke katodě, zde pak reagují s přiváděným kyslíkem a vodou dle rovnice:







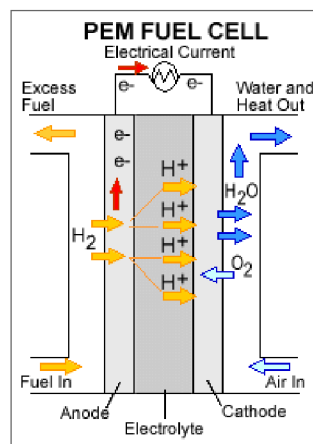
Anionty *OH*- pronikají elektrolytem a pohybují se dále k anodě. Z rovnic lze vysledovat, že voda se na anodě produkuje dvakrát rychleji, než se na katodě spotřebovává. U některých typů článků je tomu naopak.

Elektrická účinnost tohoto typu článku je 45 až 60 %. Můžeme zde pracovat s výkony do 20 kW. Jako palivo se používá čistý vodík. Článek je však citlivý na čistotu vodíku i kyslíku. Z tohoto důvodu je jeho použití omezeno na aplikace, ve kterých je k dispozici elektrolyticky získaný vodík a kde nerozhodují náklady na jeho získávání.

Konkrétní použití našly především v zařízeních pro kosmický výzkum, dále pak na lodích a v ponorkách. Možnosti jejich využití jsou velmi široké, avšak jejich vysoká cena zužuje rozsah použití na oblasti se zajištěným financováním.

### 3.2 Membránové články (články s tuhými polymery) (PEMFC) [4]

Použití článků tohoto typu je univerzální, například jako zdroje energie pro různé typy vozidel. Je to nízkoteplotní článek (obr. 3.2), pracuje při teplotách nižších než článek alkalický (20 – 80 °C). Nutností je zde opět povlak elektrod (platina nebo nikl), který působí jako katalyzátor reakce. V současnosti díky lze využít elektrody jen se slabou vrstvou platiny, což má zásadní vliv na cenu, jenž klesla na přiměřenou úroveň.



Obr. 3.2 Princip palivového článku s polymerní membránou elektrodou PEMFC [6]

Elektrolyt je polymerní membrána dovolující průchod jen pohyblivým iontům  $H^+$ . Na anodu je přiváděn plynný vodík podle rovnice:



Z vodíku, který se dostane na katalyzátorovou vrstvu, se uvolní elektrony. Tyto uvolněné částice projdou vnějším elektrickým obvodem a jsou poté přivedeny na katodu. Kationty  $H^+$  rovněž dosáhnou katody, ale pohybem v elektrolytu. Na katodě dochází k reakci elektronů přicházejících z vnějšího obvodu, vodíkových kationů a kyslíku jako oxidačního činidla. Výslednými odpadními produkty jsou voda a teplo. Reakci lze popsat rovnicí:



Vodík může být do článku dodáván přímo v čisté podobě nebo jako součást sloučeniny, ze které se získává pomocí chemických katalytických reakcí. Během těchto reakcí dochází k uvolňování vodíku z uhlovodíků (zemní plyn, metan, methanol, ethanol, čpavek).

Obě elektrody musí splňovat řadu důležitých kritérií:

- dobrá katalytická aktivita při nízkých teplotách za přítomnosti minima drahých kovů (např. platina)
- vysoká poréznost, která umožňuje efektivní transport kyslíku ke katodě
- dobrá iontová vodivost na rozhraní elektroda – membrána
- dobrá hydrofobicitá (vlastnost molekul, která se projevuje neochotou interagovat s vodou) v okolí katalyzátoru, která zabraňuje pronikání vody různými nečistotami do pórů

I tyto články jsou citlivé na čistotu dodávaného vodíku. Nečistoty v palivu nepříjemně snižují účinnost článku.

Konstruují se s výkony do 250 kW, nejčastěji v tzv. sendvičovém provedení.

Výhody membránového palivového článku:

- odolné vůči obsahu CO<sub>2</sub>
- nízká provozní teplota (bezpečnost, krátký rozběh)
- pevný a nekorozivní elektrolyt
- vysoké napětí palivového článku, vysoká proudová a výkonová hustota
- nízký provozní tlak
- jednoduchá konstrukce

Nevýhody membránového palivového článku:

- citlivost na obsah CO a S
  - drahé platinové katalyzátory
  - drahá a křehká membrána
-

### 3.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou HPO<sub>3</sub> (PAFC) [4]

Tyto články (obr. 3.3) jsou označovány jako teplé články. Rozsah jejich pracovních teplot je 170 – 250 °C. Jejich technologie je v současnosti velmi dobře zvládnutá. Elektrolytem je koncentrovaná kyselina fosforečná v pórovité mřížce karbidu křemičitého (iontoměničná membrána). Ve většině článků je jako palivo na anodovou část článku přiváděn methan (např. pro použití jako lokální zdroje energie pro skupiny domácností – výkony až 200 kW) a na katodovou část je přiváděno okysličovadlo.

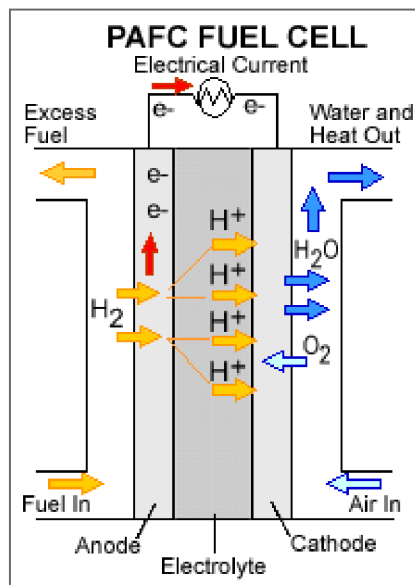
Chemická reakce na anodě je popsána rovnicí:



Chemická reakce na katodě je popsána rovnicí:



Výsledná reakce v článku pak bude mít tvar:



Obr. 3.3 Princip palivového článku s kyselinou fosforečnou PAFC [6]

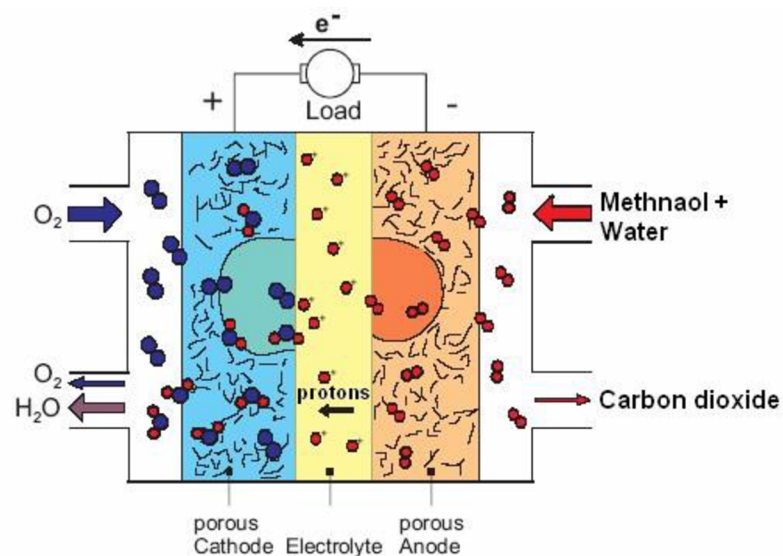
Methan  $\text{CH}_4$  je nutno zpracovat na procesní plyn s cca 80% obsahem vodíku. Energetická účinnost základního článku je poměrně nízká (42 %), lze však zvýšit recyklací odpadové páry jakožto vedlejšího produktu reakce až na 80 %.

Tato zařízení jsou vhodná pro budování blokových kogeneračních elektráren, kde se využívá i odpadní provozní teplo. Vyvinuté teplo lze rovněž využít pro ohřev užitkové vody nebo pro vytápění domácností. Cena takto vyrobené energie v kogenerační jednotce je však dosti vysoká. Chemické reakce uvnitř článku jsou prakticky totožné s reakcí uvnitř PEMFC.

Při provozu musíme doplňovat elektrolyt, který z mřížky uniká. Při nesprávně zvolené pracovní teplotě dochází k rozkladu elektrolytu nebo k pohlcování vodní páry a tím elektrolyt degraduje. Jednotka je schopna naběhnout do 3 hodin. Tyto články řadíme mezi nejspolehlivější, hlavně, jde-li o zdroje s většími výkony (od 50 kW do 10 MW).

### 3.4 Přímé methanolové články (DMFC) [4]

Jako palivo se zde používá metanol. Princip (obr. 3.4) je dosti podobný principu PEM článků. Na anodu se přivádí vodný roztok methanolu (methnaol + voda). Ionty vodíku vzniklé anodovou oxidací prostupují membránou ke katodě, kde za přísunu oxidačního činidla (kyslík) se redukují na vodu.



Obr. 3.4 Princip palivového přímomethanolového článku DMFC [7]

---

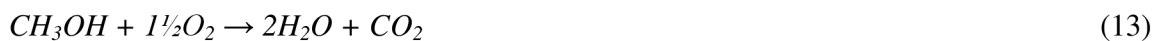
Chemická reakce na anodě je popsána rovnicí:



Chemická reakce na katodě je popsána rovnicí:



Výsledná reakce v článku pak bude mít tvar:



Na anodě se z molekuly methanolu odtrhávají volné elektrony, které jsou na katodu přiváděny vnějším obvodem. Vznikají tak vodíkové kladné ionty, které ke katodě tečou přes iontoměničnou membránu a uvolňuje se plynný oxid uhličitý  $CO_2$ . Ke konečné oxidaci na anodě však nedochází přímo, ale přes několik reakčních mezistupňů. Tyto mezistupně výrazně zpomalují průběh reakce. Oxidace metanolu je oproti oxidaci vodíku pomalejší, a to má za následek nižší svorkové napětí metanolového článku. Reakce na katodě je velmi podobná katodické reakci u článků PEM.

Je to článek nízkoteplotní, rozsah pracovních teplot je 20 – 130 °C. Elektrická účinnost se pohybuje okolo 40 %. Články řadíme do nižší výkonové skupiny – jejich výkon je do 10 kW.

Oxidace metanolu u DMFC je oproti oxidaci vodíku pomalejší. Je to způsobeno tím, že metanol není oxidován přímo, ale přes několik reakčních mezistupňů, z nichž některé limitují celkovou rychlost oxidace. Při jednotlivých mezistupních vznikají skupiny jako COH, COOH, CO, které se adsorbují na katalyzátor (platinová čerň, Pt) snadněji než vodík a blokují tak jeho

další adsorbci. Z toho důvodu se přidává do anodové vrstvy kokatalyzátor rutenium (Ru). Ru napomáhá další oxidaci uhlíkatých skupin na  $CO_2$ , který jako plyn uniká z katalytické vrstvy. Pro DMFC byl stanoven nejvýhodnější atomární poměr obou katalyzátorů Pt/Ru 1:1. Katalytické vrstvy pro anody DMFC se liší tedy od PMFC především tím, že se používá Pt/Ru čerň místo samotné Pt.

Tyto články se používají jako přenosné zdroje elektrické energie, a to především pro elektronická zařízení (např. napájení mobilů, mp3 přehrávačů, PDA, notebooků).

Zásadní vliv na chování článku mají části tzv. membránové elektrody. Jde o iontoměničnou membránu, katalytickou vrstvu a difúzní vrstvu. Uspořádání vrstev je na obrázku (obr. 3.5).



Obr. 3.5 Uspořádání membránových elektrod [4]

*A – elektrody, B – difúzní vrstva, C – katalytická vrstva, D – iontoměničná membrána*

Iontoměničná membrána plní funkci elektrolytu s kladnou iontovou vodivostí ( $H^+$ ). Je to polymerní membrána s funkčními řetězci kyseliny. Nejrozšířenější jsou membrány s obchodním názvem Nafion. Nedostatkem této membrány je prosakování metanolu od anody ke katodě. Průsak na katodě způsobuje zablokování katalyzátoru. Rozsah průsaku je do jisté míry úměrný velikosti odebíraného proudu. Membrána se nesmí vystavovat teplotám vyšším než  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Toto je také limitní faktor provozu tohoto palivového článku.

V katalytické vrstvě probíhá elektrochemická reakce. Je to mikroporézní struktura skládající se z katalyzátoru ( $Pt + Ru$ ) a elektrolytu .

Difúzní vrstva plní hned několik funkcí. Především zajišťuje dopravu paliva a oxidačního činidla ke katalytické vrstvě, odvádí produkty z reakcí na elektrodách, zprostředkovává elektrickou vodivost. Je vyrobena z uhlíkové tkaniny impregnované teflonem.

Výhody palivového přímomethanolového článku:

- nepracuje se zde s velkými tlaky (jako u článků s plynným palivem)
- je zde vyloučen únik plynného paliva
- pracuje i při pokojových teplotách

Nevýhody palivového přímomethanolového článku:

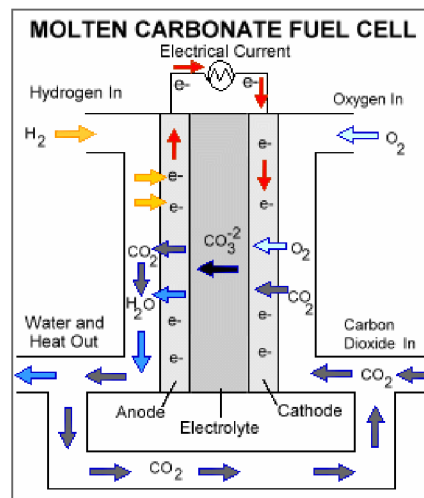
- methanol je jedovatý
- vlivem zpomalení oxidační reakce má oproti PEMFC nižší svorkové napětí
- platinový katalyzátor – vysoká cena

Problémem při realizaci tohoto palivového článku je použití katalyzátoru, který je ovšem nutností. Nejlepším katalyzátorem je tzv. platinová čerň, což jsou drobné platinové částičky s velkým aktivním povrchem a porozitou, čehož je dosaženo speciálním zpracováním. Tento materiál je v současnosti velmi drahý, čímž razantně narůstá cena DM palivového článku a tudíž je i cena za jednotku energie u tohoto článku o dost vyšší než u PEM článků.



### 3.5 Palivový článek s roztavenými uhličitany (MCFC) [4]

Tento vysokoteplotní článek (obr. 3.6) pracuje při teplotách 600 – 650 °C. Tato relativně vysoká teplota je potřeba k tomu, aby se dosáhlo potřebné vodivosti elektrolytu sestávajícího z roztavených uhličitánů draslíku a lithia v matrici z tuhé směsi oxidů lithia a hliníku. Díky takto vysoké teplotě zde není zapotřebí katalyzátor na elektrodách, který zajišťuje průběh reakcí u nízkoteplotních a teplých článků tím, že upraví přiváděné palivo na palivo s vysokým obsahem vodíku. U MCFC je tato přeměna provedena uvnitř zásobníku článku.



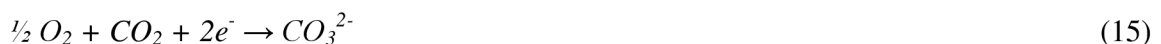
Obr. 3.6 Princip palivového článku s roztavenými uhličitany MCFC [6]

Na čistotu paliva zde neplatí tak přísné podmínky jako u článků nízkoteplotních, odpadá tedy předúprava paliva. Lze tak použít i méně čisté plyny jako bioplyn, uhelný plyn, zemní plyn či skládkový plyn. Plyn přivedeme na anodu, kde vodík, který se při vysoké teplotě uvolnil z paliva i bez pomoci katalyzátoru reaguje s uhličitany ionty  $\text{CO}_3^{2-}$  z elektrolytu za vzniku vodní páry,  $\text{CO}_2$  a elektronů.

Chemická reakce na anodě je popsána rovnicí:

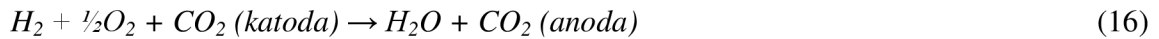


Chemická reakce na katodě je popsána rovnicí:



---

Výsledná reakce v článku pak bude mít tvar:



- anionty  $CO_3^{2-}$  přitom pronikají elektrolytem k anodě

V rovnovážném stavu je napětí článku závislé jen na parciálních tlacích  $H_2$ ,  $O_2$  a  $H_2O$ . Většinou  $CO_2$  generovaný na anodě přivádíme zpět na katodu, kde je znovu spotřebováván, je však také třeba dále zajistit i nezávislý zdroj tohoto plynu. Technologicky největší problém je návrh elektrod, které musí odolávat velmi agresivnímu prostředí a vysokým teplotám, pře kterých článek pracuje. Takovéto prostředí vyvolává korozi s podstatně snižuje životnost článku. Elektrody musí v tomto prostředí pracovat spolehlivě po dlouhou dobu.

Anoda bývá obvykle vyrobena z porézního niklu s přísadou chromu, katoda pak z porézního oxidu nikelnatého s příměsí lithia. Roztavený elektrolyt se nachází v matici ze směsi oxidů hliníku a lithia (např.  $LiAlO_2$ ).

Články tohoto typu dosahují účinností 45 – 60 %, při využití odpadního tepla lze dosáhnout účinnosti až 85%. Nejčastěji se využívají jako kogenerační jednotky o výkonu od stovek kW do jednotek MW.

#### Výhody palivového článku s roztavenými uhličitany:

- jsou odolné proti nečistotám v palivu, jako palivo lze použít zemní plyn
- není zapotřebí drahý katalyzátor
- při využití odpadního tepla lze dosáhnout účinnosti skoro 85 %

#### Nevýhody palivového článku s roztavenými uhličitany:

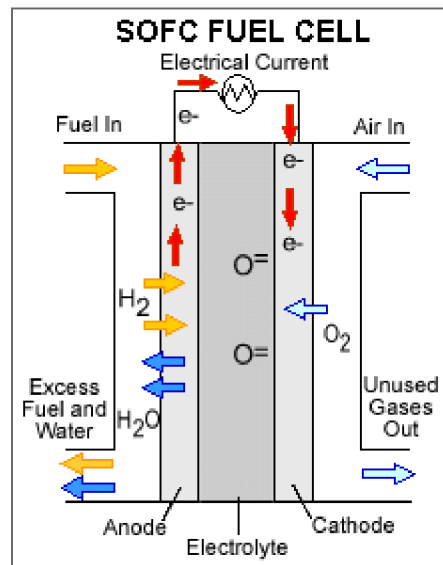
- krátká životnost vlivem agresivního korozního prostředí a vysoké teploty
- dlouhá doba náběhu – až 24 hodin

V dnešní době je ve světě aktivních více než 100 souborů s články s výkony většími než 250 kW. K větším projektům patří experimentální elektrárna v Santa Clara postavená v roce 1996 o celkovém výkonu 2 MW, jejíž elektrická účinnost se blíží 60 %, dále pak projekt Kirin Brewery plant v Japonsku, 1 MW elektrárna ve městě Renton ve státě Washington a další.

### 3.6 Palivový článek s pevnými oxidy (SOFC) [4]

Články SOFC (obr. 3.7) se v mnoha ohledech od ostatních článků liší. Především tím, že anoda, katoda i elektrolyt jsou vyrobeny výhradně z pevných materiálů keramické povahy. Díky těmto materiálům můžeme článek provozovat při teplotách až 1050 °C, což je významně více, než u všech ostatních typů článků. Odpadní teplo vznikající při chodu SOFC je ideální k dalšímu využití - kogeneraci. Drtivá většina aplikací s SOFC je zároveň producentem tepelné energie. Kogenerací zvyšujeme celkovou energetickou účinnost článku až k hodnotám převyšujícím 65 %. Mohou být uspořádány válcově nebo planárně pomocí plochých desek. Ze všech vyzkoušených oxidových materiálů se pro elektrolyt nejvíce osvědčil (a je také nejvíce používán) zirkon dotovaný yttriem. Tento oxid usnadňuje transport iontů kyslíku elektrolytem. Jako materiál elektrod se v současnosti používá speciálně upravených slitin některých kovů a jejich oxidů (Ni, Cr apod.), je však ještě stále zdokonalován problém související s jejich porézností a iontovou vodivostí na rozhraní elektroda-tuhý elektrolyt.

Pracovní teplota článku je 600 až 1050 °C. Skládá se z palivové a vzduchové elektrody a separátoru. Častější je válcové uspořádání článku, kdy je středem válce přiváděn vzduch a palivová elektroda je při povrchu válce. U tohoto vysokoteplotního článku dochází k rozkladu (reformě) CH<sub>4</sub> (methan) uvnitř článku, není tedy třeba samostatné jednotky pro separaci vodíku. Investiční náklady snižuje i fakt, že vysoké teploty podporují kinetiku probíhajících reakcí, na elektrodách pak není třeba platinové katalytické vrstvy. Na druhou stranu s sebou vysoké teploty přináší omezení s ohledem na výběr vhodných materiálů.



Obr. 3.7 Princip palivového článku s pevnými oxidy MCFC [6]

Princip činnosti SOFC: Na zápornou elektrodu přivádíme palivo (vodík nebo oxid uhelnatý) a na zápornou elektrodu okysličovadlo (vzduch nebo čistý kyslík). Molekula kyslíku na kladné elektrodě pojme elektrony přicházející z vnějšího elektrického obvodu, vznikají tak záporné ionty kyslíku. Ty putují krystalickou mřížkou elektrolytu k záporné elektrodě, kde dochází k oxidaci paliva a uvolnění dalších volných elektronů putujících vnějším obvodem ke katodě.

Používáme-li jako palivo vodík, hlavní rovnice článku je:



Je-li palivem oxid uhličitý CO, rovnice je ve tvaru:



Zvolíme-li jako palivo methan CH<sub>4</sub>, rovnice se změni na



### 3.7 Souhrn parametrů palivových článků [4]

V následující tabulce (tab. 3) shrnuji nejzákladnější parametry výše uvedených palivových článků (teplota ve °C, pohyblivý iont, typ elektrolytu, horní hranici používaných výkonů, elektrickou účinnost, typ používaného paliva, nejčastější aplikace).

Druh	Nízkoteplotní			Středněteplotní	Vysokoteplotní	
	AFC	PEMFC	DMFC		PAFC	MCFC
<b>Teplota [°C]</b>	60 ÷ 100	20 ÷ 80	60 ÷ 130	170 ÷ 250	600 ÷ 650	600 ÷ 1050
<b>Elektrolyt</b>	KOH	Iontoměničná membrána	Iontoměničná membrána	HPO <sub>3</sub>	Tavené karbonáty Li, H, K	ZiO <sub>2</sub> s dávkou Yttria
<b>Pohyblivý iont</b>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub> <sup>-</sup>
<b>Elektrická účinnost [%]</b>	45 ÷ 60	40 ÷ 60	40	38 ÷ 45	45 ÷ 60	50 ÷ 65
<b>Výkon [kW]</b>	Do 20	Do 250	Do 10	50 ÷ stovky kW	Jednotky MW	Jednotky MW
<b>Palivo</b>	H	H, reformovaná paliva	Methanol, ethanol	H, reformovaná paliva	Vodík, nepřímá paliva	Všechny druhy, bez reformování
<b>Aplikace</b>	Kosmické lodě, lodě, ponorky	Univerzální	Přenosné články	Výroba energie	Výroba energie	Výroba energie

Tab. 3.3 Souhrn parametru palivových článků [4]

---

## 4 SPECIFIKACE LETOUNU MERLIN 100 UL

Tato přestavba pohonu letadla je na žádost firmy TechProAviation s.r.o., která se zabývá konstrukcí a výrobou ultra lehkých letadel.

### 4.1 Popis letounu Merlin 100 UL [12]

Letoun (obr. 4.1) je jednomístný, jednomotorový hornoplošník s klasickým uspořádáním ocasních ploch a podvozkem příďového typu. Použitý materiál na drak je slitina hliníku. Kompozitní materiály jsou použity v malé míře na nenosné prvky.



Obr.4.1 Vzhled letounu Merlin 100 UL

Křídlo je lichoběžníkového tvaru aerodynamicky a geometricky krouceno. Konstrukce je nosníková (hlavní a zadní) se dvěma podélnými výztuhami. Příčnou kostru křídla tvoří žebra. Křídlo je vybaveno šterbinovou klapkou a křídélkem na odtokové hraně a integrální palivovou nádrží v části náběžné hrany. Uchycení křídla do trupu je realizováno centroplánem (pevně vestavěný do trupu) a závěsy nosníků.

Trup má v přední části obdélníkový řez, v ocasní části je řez kruhový. Konstrukce je poloskořepinová tvořená podélnými stringery a příčnými přepážkami.

Ocas je standardní konfigurace. Vodorovná plocha má rovnou odtokovou hranu, svislá plocha je šípová.

---



Řízení letounu je realizováno mechanickou cestou. Příčné a podélné řízení je ovládáno táhly, směrové kormidlo je ovládáno lanem. Nožní řízení je napojeno na říditelnou přední podvozkovou nohu. Klapky jsou ovládány manuálně pákou. Trimovací plocha je ovládána elektrickým servopohonem. Hydraulické brzdy hlavního podvozku fungují nezávisle, aktivují se nožním řízením.

Podvozek je tříkolový příďového typu. Hlavní podvozková noha je průběžné kompozitové konstrukce. Bržděná jsou pouze kola hlavního podvozku. Přední kolo je říditelné.

Pohonná jednotka od firmy Verner nese označení JCV 360. Jedná se o benzinový, vodou chlazený čtyřtákní dvouválec o výkonu 35 koní. Vrtule je dvoulístá s průměrem 1600 mm.

Motor pro Merlin 100 UL je čtyřtákní dvouválec od firmy Verner. S tímto motorem o výkonu 26kW dosahuje letoun Merlin 100 UL maximální horizontální rychlosti 190km/h a cestovní rychlosti na 75% plyn okolo 170km/h. Nejlepší stoupavost je 4,5m/s. Motor má spotřebu 5-6 litrů benzínu natural 95 na hodinu letu při 75% plynu. Se dvěma nádržemi o objemu 2x25 litrů je vytrvalost 5 hodin a dolet 650km.

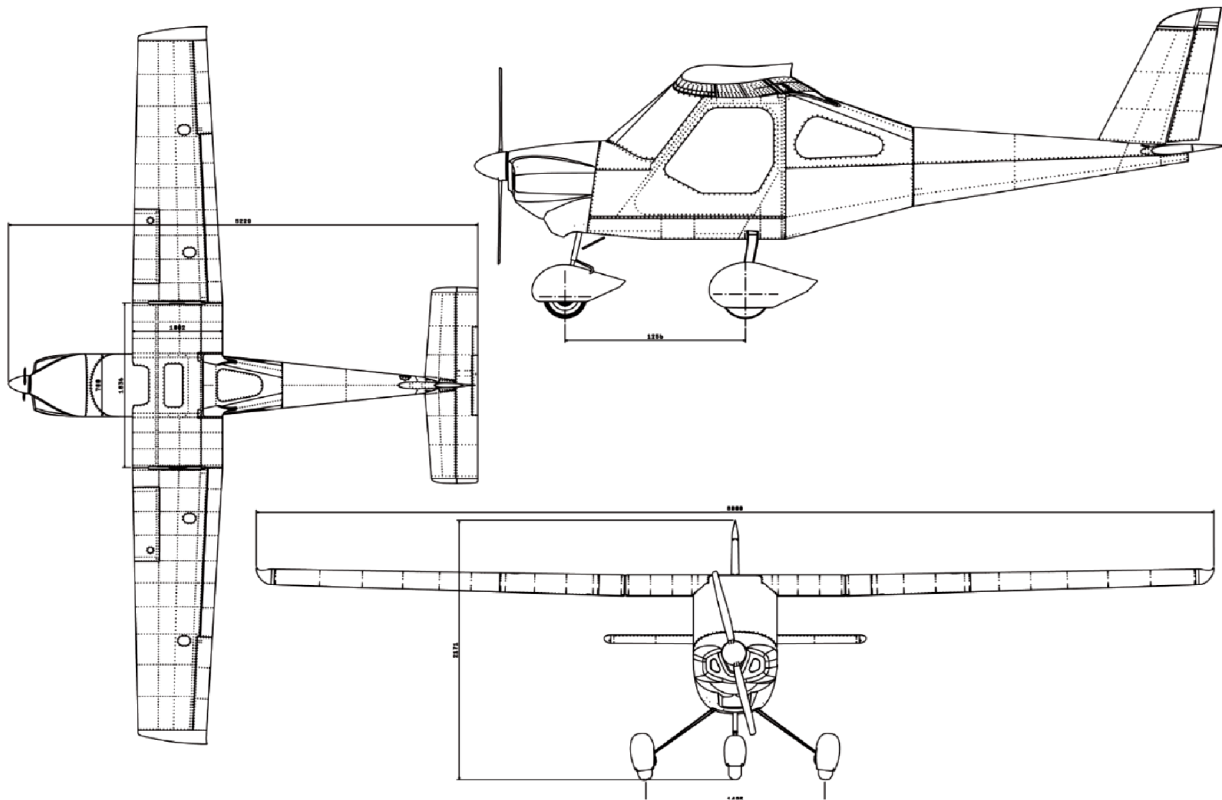
Tento pohon budeme ekvivalentně upravovat na pohon palivovými články.

Cena letounu Merlin 100 UL (verze ready to fly) se pohybuje kolem 395 000 Kč.

## 4.2 Rozměry letounu Merlin 100 UL [12]

Rozměr	m	Hmotnost	kg
Rozpětí křídel	7,8	Max. vzletová hmotnost	300
Výška	2,12	Prázdňá hmotnost	150
Délka	5,3		
Šířka kokpitu	0,7		

Tab. 4.1 Rozměry a hmotnost letounu Merlin 100 UL



Obr.4.2 Nákresey letounu Merlin 100 UL



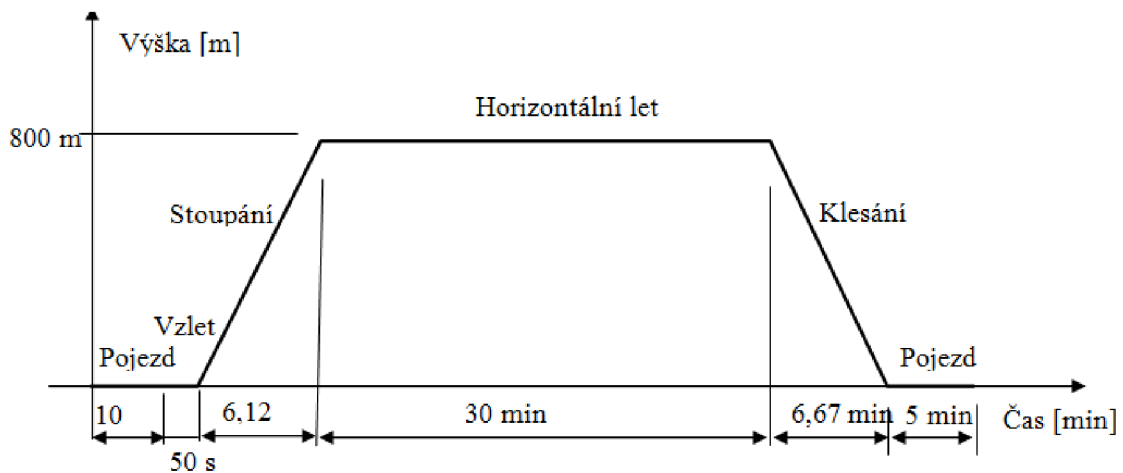
### 4.3 Požadavky na pohonnou jednotku s palivovým článkem

Palivový článek musí pracovat s nízkými teplotami. Při jeho používání nesmí vznikat žádné produkty zatěžující životní prostředí. Jeho rozměr by měl být co nejvíce kompaktní tak aby se vešel do křídla a také by měl mít nízkou hmotnost.

Zadané požadavky:

- maximální výkon (startovací):  $P_{max} = 25 \text{ kW}$
- výkon trvalý (nominální):  $P_{nom} = 20 \text{ kW}$
- vytrvalost na trvalém výkonu:  $t_{letu} = 55 \text{ minut}$
- hmotnost letadla:  $m = 300 \text{ kg}$
- max. stoupání letadla:  $v_{st} = 3 \text{ m/s}$
- cestovní rychlost  $v = 150 \text{ km/hod}$
- uvažovaná výška letu bude 800 m

Pro výpočet výkonu a spotřeby vodíku palivového článku nás budou zajímat pouze tři hodnoty, což jsou maximální výkon, výkon trvalý a vytrvalost na trvalém výkonu ( $P_{max}$ ,  $P_{nom}$ ,  $t_{letu}$ ).



Obr. 5.1 Uvažovaný profil letu

Tento graf (obr. 5.1) odpovídá zadaným požadavkům letadla s pohonnou jednotkou na palivový článek.

---

## 5 NÁVRH PALIVOVÉHO ČLÁNKU PRO POHON LETOUNU MERLIN 100 UL

### 5.1 Proč jsem zvolil palivový článek typu PEM:

Je to nízkoteplotních PČ s polymerní elektrolytovou membránou (PEM) využívající jako palivo vodík ( $H_2$ ) a jako oxidovadlo kyslík ( $O_2$ ) má oproti jiným druhům PČ tu výhodu, že reakčním produktem je pouze voda a nevznikají žádné ekologicky nežádoucí skleníkové nebo toxické plyny. Také pracuje za nízkých teplot. A má dobrý poměr mezi elektrickým výkonem a hmotností palivového článku. Dále použité palivo, vodík má vysokou hodnotu spalného tepla oproti jiným palivům (viz. tab. 5.1).

Palivo (plynné)	Spalné teplo [MJ/kg] (20°C, 1atm)
Vodík	142
Metan	56
Etan	52
Propan	50
Butan	50
Palivo (kapalné)	Spalné teplo [MJ/kg] (20°C, 1atm)
Benzín	47
Motorová nafta	45
Metanol	23
Etanol	30

Tab. 5.1 Spalná tepla různých paliv [13]

## 5.2 Výpočet palivového článku typu PEM H<sub>2</sub> – O<sub>2</sub>:

Základní reakční rovnice může být napsána v následujícím tvaru:



Energetické poměry výše uvedené reakce jsou následující [14]:

$$\Delta G = -237,3 \text{ kJ/mol při } 25^\circ\text{C}$$

$$\Delta H = -285,8 \text{ kJ/mol při } 25^\circ\text{C}$$

Kde  $\Delta G$  představuje změnu volné Gibbsovy energie a  $\Delta H$  změnu entalpie při uvedené teplotě.

Oproti většině běžných spalovacích reakcí je tedy reakční produkt, voda, v kapalném skupenství, zatím co reaktanty jsou ve skupenství plynném, přičemž u většiny spalovacích reakcí tomu bývá přesně naopak. S tímto jevem souvisí i fakt, že v této reakci je změna entropie ( $T\Delta S$ ) oproti teoretickým poučkám záporná a její změna tedy přispívá k celkovému zvýšení Gibbsovy volné energie, která se počítá podle vztahu [14]:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \text{ [kJ/mol]} \quad (21)$$

Kde  $\Delta G$  představuje změnu volné Gibbsovy energie,  $\Delta H$  změnu entalpie a  $T\Delta S$  změnu entropie při dané teplotě. Základním účelem PČ je samozřejmě přeměna chemické energie uložené v palivu na energii elektrickou a to v ideálním případě jak bez ohmických tepelných ztrát, tak bez jiných ztrát, u této technologie nejčastěji způsobených nevratnými změnami na elektrodách. Pokud budeme uvažovat takovýto ideální PČ, můžeme spočítat jeho maximální teoretickou účinnost – za předpokladu, že veškerá volná Gibbsova energie se přeměňuje na žádoucí formu energie (u popisovaného PČ na energii elektrickou) – na základě hodnot reakčních energií uvedených výše v této kapitole podle následujícího vztahu [14]:

$$\eta_{max. - teor.} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot 100 = \left( \frac{-237,3}{-285,8} \right) \cdot 100 = 83 \% \quad (22)$$

Takto vysoká hodnota teoretické účinnosti přeměny energie je ve srovnání se spalovacími motory možná díky skutečnosti, že přeměna energie v PČ není na rozdíl od spalovacích motorů limitována Carnotovým cyklem. Při praktickém provozu PČ PEM probíhá konverze chemické energie vodíku na energii elektrickou obvykle s účinností kolem 59 %. [13]

### 5.2.1 Výpočet napětí palivového článku PEM H<sub>2</sub> – O<sub>2</sub>

Po palivovém článku požadujeme, aby při provozu nepřetržitě dodával do pohonné jednotky potřebný elektrický výkon. Žádoucí je zkonstruovat PČ tak, aby bylo jeho svorkové napětí co nejvyšší a co nejméně závislé na výkonovém zatížení (ideální zdroj napětí). Uvnitř článku by proto nemělo docházet ke zpomalování reakčních mechanismů ani k nežádoucím nevratným dějům. [13]

Napětí ideálního PČ, ve kterém se veškerá energie paliva přeměňuje na energii elektrickou a uvnitř kterého nedochází k nevratným reakčním a polarizačním pochodům. Potom napětí článku za standardních podmínek ( $p = 101,3\text{kPa}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ , koncentrace reaktantů i produktů  $c = 1\text{mol/l}$ ) můžeme spočítat [13]:

$$E^0 = -\frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{n \cdot F} = -\frac{\Delta G}{n \cdot F} = -\frac{-237,3 \cdot 10^3}{2 \cdot 96485,339} = 1,23 \text{ V} \quad (23)$$

kde:

$E^0 [V]$  ... standardní elektrodový potenciál

$\Delta G [kJ/mol]$  ... změna volné Gibbsovy energie

$\Delta H [kJ/mol]$  ... změna entalpie

$T \cdot \Delta S [kJ/mol]$  ... změna entropie při dané teplotě

$n [-]$  ... počet elementárních elektrických nábojů (elektronů) vyměněných mezi reaktanty a produkty při oxidoredukční reakci podle chemické rovnice reakce,  $n = 2$  ... 2 elektrony vodíku H<sub>2</sub>

$F [C/mol]$  ... Faradayova konstanta:  $F = 96\,485,339 \text{ C/mol}$

Pro obecnou hodnotu napětí článku při nestandardních podmínkách pak platí Nernstova rovnice [14]:

$$E = E^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left[ \frac{p(H_2) \cdot p(O_2)}{p(H_2O)} \right] = 1,23 - \frac{8,314462 \cdot 343,15}{2 \cdot 96\,485,339} \cdot \ln \left[ \frac{101325 \cdot 101325}{38900} \right]$$

$$E = 1,045 \text{ V} \quad (24)$$

kde:

- tlak vodíku v palivovém článku bude:  $p(H_2) = 101325 \text{ Pa}$
- tlak výstupní vody:  $p(H_2O) = 38900 \text{ Pa}$
- vzduchu bude atmosférický:  $p(O_2) = 101325 \text{ Pa}$
- pracovní teplota článku bude:  $T = 70 \text{ }^\circ\text{C} + 273,15 = 343,15 \text{ K}$

$E [V]$  ... obecné napětí článku při nestandardních podmínkách

$E^0 [V]$  ... vratné napětí článku za standardních podmínek

$R [J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}]$  ... univerzální plynová konstanta  $R = 8,314\,462 \text{ J} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$

$T [K]$  ... absolutní teplota

$p [Pa]$  ... parciální tlak reakčních plynů

Pro další výpočet si musíme zvolit rozměr článku, ve které probíhá chemická reakce. Tu volím na základě místa v dutině křídla. Rozměr článku bude  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ , z čehož vyplívá že velikost plochy článku je:  $S = 10 \cdot 10 = 100 \text{ cm}^2$

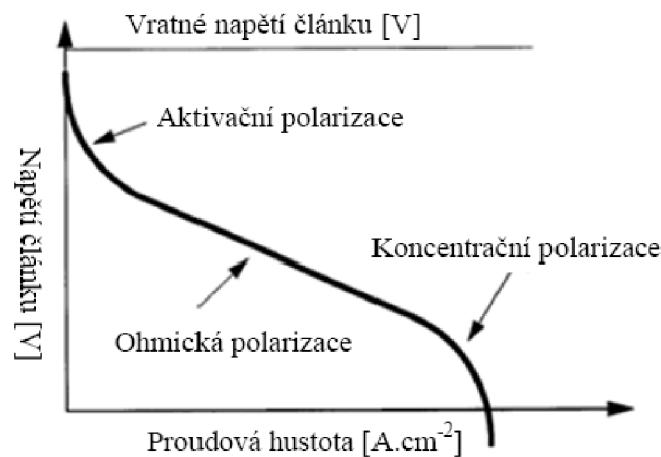
Dále musíme zvolit proud v palivovém článku, jenž nám ovlivňuje výkon palivového článku. Opakovanými výpočty (iterační metodou) jsem zjistil, že proud bude mít tuhle hodnotu:  $I = 95 \text{ A}$

Výpočet proudové hustoty palivového článku:

$$i_{P\check{c}} = \frac{I}{S} = \frac{95}{100} = 0,95 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \quad (25)$$

Palivový článek, podobně jako ostatní chemické zdroje elektrické energie vykazuje pokles svorkového napětí při zatěžování. Tento pokles napětí je způsoben obecně nevratnými ději probíhajícími v reálném palivovém článku (také se mluví o polarizačních nebo přepětových dějích). Celkový úbytek napětí je tvořen zejména třemi dílčími úbytky zapříčiněnými chemickými, fyzikálními a technologickými jevy. Jedná se o následující jevy spojené s úbytkem elektrodového napětí (viz. obr. 5.2) [13]:

1. Aktivační polarizace ( $U_{akt.}$  [V])
2. Ohmické ztráty ( $U_{ohm.}$  [V])
3. Koncentrační ztráty ( $U_{konc.}$  [V])



Obr. 5.2 Úbytek napětí palivového článku při zatížení [14]

#### Ad 1.: Aktivační polarizace:

Tento jev je způsoben chemicko – fyzikálními poměry v okolí elektrod, především pomalou kinetikou elektrochemických reakcí probíhajících na jejich povrchu. Podobně jako u jiných chemických reakcí, u elektrochemických reakcí je potřeba pro jejich započetí překonat aktivační bariéru, která se projevuje jako aktivační polarizace. Její velikost se odvíjí od materiálových vlastností povrchu elektrod (fyzikální a chemické vlastnosti materiálu současně s výrobním provedením – např. drsný × hladký povrch), přítomnosti (či nepřítomnosti), typu a koncentrace katalyzátorů, absorpce či desorpce reaktantů a produktů na povrchu elektrod a přechodem elektronů přes elektrickou dvojvrstvu vzniklou u povrchu elektrod. [13]

V literatuře [14] se pro výpočet aktivační polarizace uvádí tzv. Tafelova rovnice [14]:

$$U_{akt} = \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{i_{PČ}}{i_0} \right) [V] \quad (26)$$

$$U_{akt} = \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{i_{PČ}}{i_0} \right) = \frac{8,314462 \cdot 343,15}{0,42 \cdot 2 \cdot 96\,485,339} \cdot \ln \left( \frac{0,95}{5 \cdot 10^{-4}} \right) = 0,2658 V$$

Kde:

$\alpha_c [-]$  ... je koeficient přenosu elektronů, může nabývat těchto hodnot  $\alpha_c = 0 \div 1$ , pro symetrický přenos elektronů se volí:  $\alpha_c = 0,5$ , pro většinu elektrochemických reakcí se volí  $\alpha_c$  v tomto rozmezí od 0,2 do 0,5. Volím  $\alpha_c = 0,42$ .

$i_0 [A \cdot cm^{-2}]$  ... výměnná proudová hustota, volí se v závislosti na použitém materiálu u katalyzátoru. Budeme používat platinový katalyzátor z tab. 5.2 vyplývá že  $i_0 = 5 \times 10^{-4}$

Materiál katalyzátoru	$i_0 [A/cm^2]$
Pb (olovo)	$2,5 \times 10^{-13}$
Zn (zinek)	$3 \times 10^{-11}$
Ag (stříbro)	$4 \times 10^{-7}$
Ni (nikl)	$6 \times 10^{-6}$
Pt (platina)	$5 \times 10^{-4}$
Pd (palladium)	$4 \times 10^{-3}$

Tab. 5.2 Výměnná proudová hustota pro různé druhy katalyzátorů

---

Ad 2.: Ohmické ztráty (polarizace):

Tyto ztráty jsou způsobeny odporem, který klade elektrolyt v článku, materiál elektrod a kontaktním odporem na styku elektrolytu s elektrodami. Tyto ztráty popisuje Ohmův zákon [13]:

$$U_{ohm} = R_{ohm} \cdot i_{p\check{c}} [V] \quad (27)$$

$$U_{ohm} = R_{ohm} \cdot i_{p\check{c}} = 0,226 \cdot 0,95 = 0,2148 V$$

Kde:

$U_{ohm} [V]$  ... je úbytek napětí v důsledku ohmických ztrát,

$R_{ohm} [\Omega cm^2]$  ... je celkový odpor článku (zahrnující elektrický, iontový a kontaktní odpor). Pro náš článek je odpor roven:  $R_{ohm} = 0,226 \Omega cm^2$

Ad 3.: Koncentrační polarizace:

Koncentrační polarizace se většinou objevuje až při velkém zatížení článku, kdy jsou reaktanty rychle spotřebovávány a dojde k vytvoření koncentračního gradientu mezi částí elektrolytu v oblasti u povrchu elektrod a ostatní částí elektrolytu. Pomalá difuze reakčních plynů na elektrodách je hlavní příčinou koncentračních ztrát, i když pomalý pohyb částic směřujících at už z elektrolytu k elektrodě nebo naopak hraje také určitou roli. [13]

Výpočet koncentrační ztráty [14]:

$$U_{konc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left( 1 - \frac{i_{p\check{c}}}{i_{max}} \right) [V] \quad (28)$$

$$U_{konc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left( 1 - \frac{i_{p\check{c}}}{i_{max}} \right) = \frac{8,314462 \cdot 343,15}{2 \cdot 96\,485,339} \cdot \ln \left( 1 - \frac{0,95}{0,98} \right)$$

$$U_{konc} = -4,6 \cdot 10^{-4} V$$

Kde:

$i_{max} [A/cm^2]$  ... je maximální proudová hustota palivového článku. U PEM článků je maximální proudová hustota rovna:  $i_{max} = 0,98 A/cm^2$

Vypočtená hodnota  $U_{konc}$  má tak nízkou hodnotu, že ji můžeme zanedbat.

---



### 5.2.2 Celkové napětí palivového článku

Výpočet celkového napětí v palivovém článku:

$$U_{P\check{c}} = E - U_{akt} - U_{ohm} = 1,045 - 0,2658 - 0,2148 = 0,5644 \text{ V} \quad (29)$$

### 5.2.3 Výpočet výkonu palivového článku

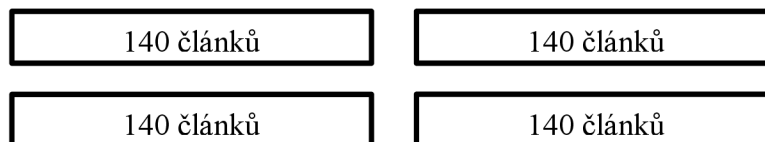
Výkon 1 cm<sup>2</sup> palivového článku spočítáme z:

$$P_{(1cm^2)} = U_{P\check{c}} \cdot i_{P\check{c}} = 0,5644 \cdot 0,95 = 0,5362 \text{ W/cm}^2 \quad (30)$$

Výkon palivového článku o naší zvolené ploše  $S = 100 \text{ cm}^2$  bude:

$$P_{(100cm^2)} = P_{(1cm^2)} \cdot S = 0,5362 \cdot 100 = 53,62 \text{ W} \quad (31)$$

Abychom dosáhli požadovaného výkonu  $P_{max} = 25 \text{ kW}$ , poskládáme jednotlivé články za sebe do série. Po 140 kusech ve 4 blocích obr. 5.3.



Obr. 5.3 Schéma čtyř bloků po 140 člancích = 560 článků

Potom celkový výkon jednoho bloku:

$$P_{P\check{c}} = P_{(100cm^2)} \cdot 140 = 53,62 \cdot 140 = 7506,8 \text{ W} \quad (32)$$

### Celkový výkon všech čtyř bloků:

$$P_{celk} = P_{P\check{c}} \cdot 4 = 7506,8 \cdot 4 = 30027,2 \text{ W} = \underline{\underline{30,0272 \text{ kW}}} \quad (33)$$

Celkový výkon  $P_{celk} = 30,0272 \text{ kW}$  nám splňuje zadané požadavky jenž byli  $P_{max} = 25 \text{ kW}$ .

#### 5.2.4 Výstupní proud ze všech 4 bloků palivových článků

Jelikož budou všechny palivové články zapojeny v sérii bude proud stejný jako v prvním palivovém článku.  $I_{out} = I = 95 \text{ A}$

#### 5.2.5 Výstupní napětí ze všech 4 bloků palivových článků

Všechny palivové články jsou zapojeny v sérii tudíž napětí se sčítá (vynásobíme napětí jednoho článku celkovým počtem všech článků, což je:  $140 \cdot 4 = 560$ ):

$$U_{out} = U_{PC} \cdot 560 = 0,5644 \cdot 560 = 316,064 \text{ V} = 316,1 \text{ V}$$

#### 5.2.6 Výpočet spotřeby paliva ( $\text{H}_2$ ) při maximálním výkonu článku

Pro výpočet objemového množství spotřebovaného vodíku vyjdeme částečně z Faradayových zákonů a definic elektrického proudu a molárního množství:

$$I = \frac{Q}{t} \Rightarrow Q = I \cdot t \quad (34)$$

Kde:

$Q$  [C] ... je elektrický náboj prošlý obvodem zapojeným k palivovému článku

$I$  [A] ... elektrický proud

$t$  [s] ... čas

Pro maximální hodnotu výkonu (30,0272 kW) je proud článkem:

$$I = 95 \text{ A} = 95 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$$

Počet elektronů  $N_e$  prošlých obvodem při této hodnotě proudu za 1 s:

$$N_e = \frac{I}{e} = \frac{95}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 5,93 \cdot 10^{20} \text{ s}^{-1} \quad (35)$$

Kde  $e$  [C] je náboj elektronu (elementární náboj).  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Na anodě probíhá oxidace podle rovnice:



A na katodě naopak redukce podle rovnice:



Z rovnice (36) je patrné, že jedna molekula vodíku  $H_2$  odevzdá při reakci v PČ na anodě dva elektrony. Jestliže potom podělíme počet elektronů prošlých obvodem za 1s ( $N_e$ ), Avogadrovou konstantou  $N_A$ , dostaneme jejich množství za 1s vyjádřené v molech. Z rovnice (36) dále plyne, že počet molekul vodíku je oproti počtu elektronů poloviční, vypočtené množství elektronů tedy ještě podělíme dvěma a dostaneme množství molekul vodíku zreagovaných za 1s ( $\text{mol}_{H_2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Nakonec vynásobíme celou rovnicí molární hmotností vodíku ( $M = 2 \text{ [g/mol]}$ ) čímž dostaneme hmotnost.

Popisovaný postup můžeme zapsat následovně a rovnou dosadit:

Spotřeba jednoho článku:

$$S_{p1} = \frac{N_e \cdot M}{2 \cdot N_A} = \frac{5,93 \cdot 10^{20} \cdot 2}{2 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}} = 9,8474 \cdot 10^{-4} \frac{\text{g } H_2}{\text{s}} \quad (38)$$

Spotřeba všech 4 bloků palivových článků (560 článků):

$$S_{\text{celk}} = S_{p1} \cdot 560 = (9,8474 \cdot 10^{-4}) \cdot 560 = 0,55145 \frac{\text{g } H_2}{\text{s}} \quad (39)$$

**Spotřeba vodíku na 40 minut (2400 s) letu:**

$$S_{\text{letu}} = S_{\text{celk}} \cdot 2400 = 0,55145 \cdot 2400 = 1323,49 \text{ g } H_2 \Rightarrow m = 1,32 \text{ kg} \quad (40)$$

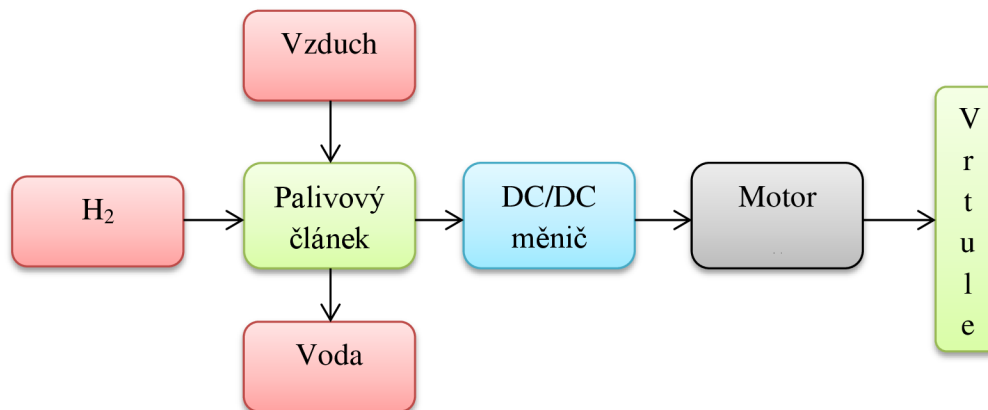
Přepočítání na litry při vstupním tlaku vodíku  $p(H_2) = 101325 \text{ Pa}$  (atmosférický tlak)

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \Rightarrow V = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot p} \quad (41)$$

$$V = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot p} = \frac{1,32 \cdot 8,314462 \cdot 298,15}{2 \cdot 0,1 \cdot 10^6} = 16,4 \text{ litru vodíku}$$

## 6 PŘESTAVBA POHONU LETOUNU MERLIN 100 UL

### 6.1 Schéma pohonné jednotky letadla



Obr. 6.1. Schéma pohonné jednotky letadla

### 6.2 Přívod paliva z palivového článku

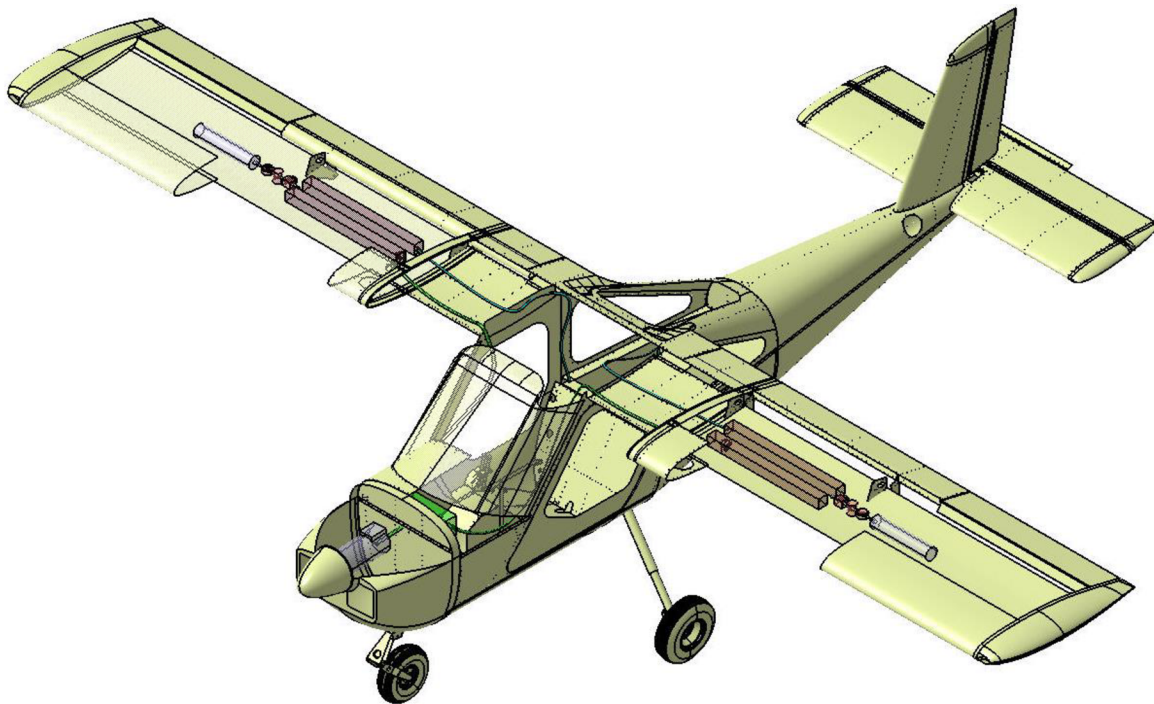
Vodík bude uskladněn v nádrži pod tlakem 4,5 MPa a bude mít teplotu 25 °C. Přes redukční ventil bude přiváděn potrubím do palivového článku. Redukční ventil sníží tlak vodíku na vstupu do palivového článku na tlak atmosférický. Nádrže viz. kapitola 7.

Vzduch bude nasaván přímo z ovzduší (bude mít atmosférický tlak a teplotu okolí cca 25°C) a bude přiváděn do palivového článku.

### 6.3 Palivový článek

Článek se vyrábí ve tvaru mnohavrstvého sendviče složeného z dílčích článků. Každý dílčí článek se skládá se dvou elektrod oddělených membránou z pevného polymeru.

Schéma zapojení palivových článků v letounu:



Vnější rozměry jednoho bloku palivového článku: 150 x 150 – 720 mm.

Hmotnost 1 bloku palivových článků je 17 kg.

V letadle jsou 4 bloky palivových článků po dvou v jednom křídle. Nádrže na vodík jsou dvě každá v jednom křídle.

---

## 6.4 Měníč (DC / DC měnič)

Jedná se součástku mezi palivovým článkem a motorem. Je takřka nemožné zkombinovat palivový článek a elektromotor přímo bez použití usměrňovače či měniče.

Zjednodušená definice říká: Měníč v elektrotechnice je zařízení sloužící ke změně parametrů elektrické energie. Základními parametry elektrické energie jsou velikost elektrického napětí, proudu, u střídavých napájecích systémů také frekvence. Z fyzikální podstaty vyplývá, že účinnost přeměny energie je vždy menší než 100%, každý měnič má tedy ztráty. Měníče elektrické energie většinou pracují s velmi dobrou účinností, ztráty v okolí pracovního bodu jsou kolem 5%, pokud je však zařízení nezátžené relativní ztráty bývají vyšší. [15]

V mém případě se jedná o DC/DC měnič protože palivový článek vytvoří stejnosměrné napětí, přičemž zvolený motor pro rozběh také potřebuje stejnosměrné napětí ale o jiných hodnotách.

Pojmem DC/DC-měníč nebo také stejnosměrný měnič se obvykle označuje elektronický měnič napětí určený pro změnu velikosti stejnosměrného napětí nebo proudu, obecně pro převod mezi různými stejnosměrnými napájecími soustavami. [15]

Motor i palivový článek produkují dosti vysoké hodnoty napětí a proudu s velkým celkovým výkonem. Proto bylo opět nutné hledat nestandardní měniče, ale hlavně hledat ve výkonové oblasti průmyslové techniky.

Potřebujeme měnič co nám upraví napětí  $U_{\text{out}} = 316 \text{ V}$  a proud  $I = 95 \text{ A}$  z palivového článku, na vstupní parametry motoru jež jsou  $I_{\text{motor}} = 400 \text{ A}$ ,  $U_{\text{motor}} = \text{V}$

Jako nejvíce vyhovující byl vybrán výrobek Mentor MP firmy EMERSON Industrial Automation divize Control Techniques. Konkrétně model MP420A4(R).

Mentor MP je stejnosměrný měnič 5. generace společnosti Control Techniques, který adoptoval řídicí část z univerzálního střídavého měniče Unidrive SP. Díky tomu se Mentor MP řadí k nejvyspělejším stejnosměrným měničům na trhu. Poskytuje optimální výkon a flexibilní systémové rozhraní.

Výkon na výstupu z měniče bude nižší o jeho ztráty:

$$P_2 = 30,03 \text{ kW} \cdot 0,95 = 28,53 \text{ kW} \dots \text{ výkon na výstupu z měniče}$$



Obr.6.3 Měnič Mentor MP [22]

model	MP420A4®
vstupní napětí	300 V DC
vstupní proud	95 A
výstupní napětí	480 V DC
výstupní proud	420 A
rozměry (VxŠxH)	450x423x301

Tab. 6.2 Parametry měniče [22]

## 6.5 Motor

Při hledání motoru jsem byl svázán několika podmínkami:

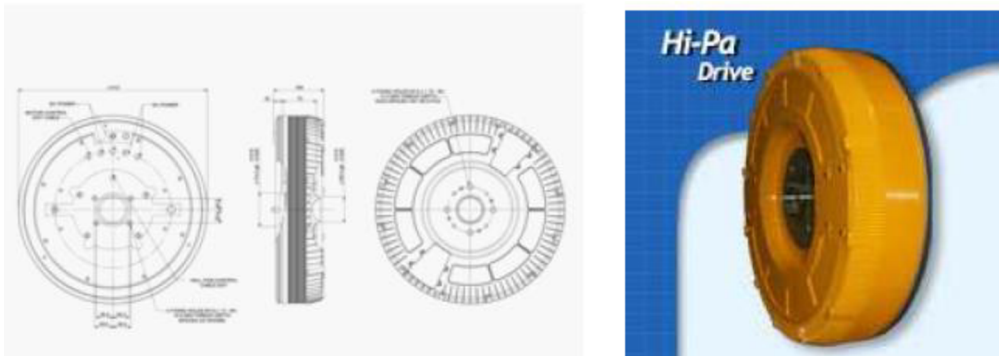
- motor musí být bezpečný pro použití ve vodíkovém prostředí
- pokud možno bezúdržbový nebo s minimálními nároky na údržbu
- vysoká spolehlivost
- váha motoru co nejbližší poměru 1kW / 1kg

Poslední uvedená podmínka byla zároveň nejtěžší a nejvíce svazující. Běžně vyráběné synchronní motory buzené permanentními magnety o požadovaném výkonu dosahují váhy 150kg a více. Takto náročné kritérium na váhu motoru znamenalo začít hledat ve specializovaných oblastech průmyslu. Mnoho automobilek se již zabývalo vývojem vlastního elektromobilu. Po zkombinování informací z tohoto zdroje [16] jsem vybral následující motor: stejnosměrný

bezkartáčový s permanentním NEODYM magnetem Hi-Pa Drive™ výrobce PML Flightlink Ltd.  
[17] Regulace je pulsní procesorem řízená umístěná přímo v motoru jako jeho součást.

Výkon na výstupu z motoru bude nižší o jeho ztráty:

$$P_3 = 28,53 \text{ kW} \cdot 0,95 = 27,1 \text{ kW} \dots \text{výkon na výstupu z motoru}$$



Obr.6.2 Konstrukce motoru a motor Hi-Pa Drive [21]

Typ	HPD30
Točivý moment max	350 N·m
Výkon max	40 kW
Váha	18 kg
Vstup	400 Vss max, 400A
Rychlost max	2000 ot/min

Tab. 6.1 Parametry motoru [21]



---

## 7 NÁVRH VHODNÝCH PALIVOVÝCH NÁDRŽÍ PRO LETOUN MERLIN 100 UL

### 7.1 Skladování vodíku

Skladování vodíku je spojeno s problémy, které představuje nízká hustota vodíku, molekuly vodíku jsou malé, proto může difúzně pronikat i některými materiály jako jsou některé kovy a plasty v kapalném i plynném stavu. Dále vodík způsobuje vodíkové křehnutí a je vysoce reaktivní. Existuje několik technických možností skladování vodíku. Nejpoužívanější variantou je skladování plynného vodíku v bateriových zásobnících. Pro větší skladovací množství se využívá skladování v kapalném skupenství. Vodík lze skladovat i v hydridech kovů. [11]

#### 7.1.1 Skladování vodíku v plynném skupenství

V případě skladování plynného vodíku se používají nádoby s rozsahem tlaku mezi 40-200 MPa. Zásobníky se vyrábějí z nízkouhlikové oceli bez použití svaru v bateriovém uspořádání. Tento způsob skladování je poměrně levný, ale drahá je výroba zásobníků. Další možností skladování vodíku v plynné formě je skladování v podzemních úložištích. Obvykle se jedná o vytěžené solné doly, nebo jeskyně zemního plynu. Tlak skladovaného vodíku se obvykle pohybuje kolem 11 MPa, vyšší tlak se nepoužívá z důvodu možného překročení kapilárních sil udržujících vodu v mikropórech a následného úniku vodíku. Ve světě se tato metoda využívá na několika místech, např. v Amarillo v Texasu (850 mil. m<sup>3</sup>), ve francouzském Beynes (330 mil. m<sup>3</sup>), anglickém Billingtonu (2,2 mil m<sup>3</sup>). Další úložiště se nacházejí např. v Německu a Holandsku. [11]

#### 7.1.2 Skladování vodíku v kapalném skupenství

Při skladování vodíku v kapalném stavu je nutné, vodík zchladit až pod teplotu varu a dochází ke ztrátám na energii uchované ve vodíku. Jedná se o velmi náročnou metodu skladování z konstrukčního i ekonomického hlediska, neboť nízkou teplotu je nutno udržovat. Proto jsou tyto zásobníky dokonale izolovány. Je nutné mít velmi čistý vodík, protože při ochlazení dochází ke zkapalnění nebo ztuhnutí všech nežádoucích příměsí. [11]

#### 7.1.3 Skladování vodíku v hydridech kovů

Systémy skladování vodíku v hydridech jsou založeny na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Jedná se o exotermní reakci, tzn. že je při absorpci vyvíjeno teplo. Opačného děje - desorpce, tedy uvolňování vodíku z materiálu je naopak dosaženo dodáním tepla. Sledovanými parametry u těchto systémů jsou především teplota, při které dochází k desorpci vodíku z materiálu, hmotnostní kapacita absorbátoru (případně celého systému),

objemová kapacita absorbátoru a v neposlední řadě cena a složitost systému. Podskupinou hydridů jsou metalhydridy a komplexní hydridy. [19]

## 7.2 Proč jsem zvolil uskladnění vodíku v metalhydridových zásobnících

Pro uchování paliva jsem po důkladném porovnání dostupných technologií zvolil metal-hydridové zásobníky. Oproti kryogenním nádržím potřebným ke skladování vodíku v kapalně formě, či tlakovým nádobám, které by umožňovaly skladování stlačeného plynu má technologie metalhydridů několik výhod:

- skladování je energeticky méně náročné
- bezpečnější – nepracuje se s vysokým tlakem ani velmi nízkou teplotou
- naplnění zásobníku je možné i v „domácích“ podmínkách

Při výběru konkrétního zásobníku vodíku pro tento projekt jsem zvažoval tři důležité parametry: rozměry, objemová kapacita, váha

Samozřejmě některé parametry jsou protichůdné. Požaduji co největší objem kladovaného vodíku při minimálních rozměrech a co nejnižší váze. Jako nejvíce vyvážený jsem vybral produkt firmy H Bank Technology zásobník HB-SC-0220-Q.

Kapacita	220 l ± 5%
Provozní teplota	10 - 25 °C
Provozní tlak	4 - 5 MPa
Rozměry	50 x 300
Váha	2,5 kg

Tab. 7.1 Parametry zásobníku na vodík [20]



Obr. 7.1 Metal-hydridový zásobník firmy H Bank Technology HB-SC-0220-Q [20]

Se dvěma zásobníky této kapacity by měl letoun vybržet ve vzduchu 17,8 hod.

## 8 ZÁVĚR

Palivové články jsou významným budoucím prostředkem k výrobě elektrické energie. V současné době, kdy se stále více hovoří o nedostatku ropy a zemního plynu pro budoucí generace. Intenzivně se hledají různé způsoby, jak tyto suroviny v budoucnu nahradit. Jedním z možných řešení je právě širší využití systémů s palivovými články.

V první části práce je vysvětlen základní princip fungování palivového článku a rozbor jeho nejdůležitějších částí jako jsou elektrody a membrána. Dále jsou palivové články rozděleny do tříd dle typu elektrolytu a podle pracovní teploty. Každý typ je zde popsán a vysvětlen jeho princip fungování i jejich výhody a nevýhody. Nakonec jsou všechny typy palivových článků srovnány v tabulce.

V další kapitole jsem se zaměřil na problematiku nízkoteplotních palivových článků  $H_2 - O_2$  s polymerní membránou. Na jejich návrh a výpočet, pomocí termodynamických výpočtů palivových článků. Dle těchto vztahů jsem vypočítal elektrické napětí, proud, spotřebu paliva a také výkon palivového článku.

Na základě výše zmíněných znalostí jsem navrhl systém pohonu ultra-lehkého letadla pomocí elektromotoru, s využitím palivových článků jako zdroje energie. Velice důležitou částí práce byla volba jednotlivých komponentů celého systému. Jejich vzájemné propojení a vybalancování vlastností. To vše za účelem dosažení co nejlepších vlastností pohonu jako celku. Mnou zvolené komponenty co nejlépe odpovídají zadání projektu a jsou voleny s ohledem na kvalitu a požadavky.

---

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Z.Porš, Palivové články [online], Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s., 2002
- [2] Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik der Universität Karlsruhe. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www-iwe.etec.uni-karlsruhe.de>
- [3] SKIBIK, P. *Nizkoteplotní kyslíko-vodíkové palivové články*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 71 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marie Sedlaříková, CSc.
- [4] FURKA, D. Palivové články. ČVUT FEL K315, 2006. 30 s.
- [5] CIVÍN, V. Nové progresivní energetické zdroje pro armádu. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.army.cz/vti/vojroz/zvl2000/165.htm>
- [6] FCT Fuel Cells: Types of Fuel Cells. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html)
- [7] Fuel Cells: Types of Fuel Cells. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: [http://www.koimano.com/public/base/allegati/dmfc1\[1\].jpg](http://www.koimano.com/public/base/allegati/dmfc1[1].jpg)
- [8] CIVÍN, Vladimír. Palivové články - nový energetický zdroj. In: [online]. 26.3.2003 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1428-palivove-clanky-novy-energeticky-zdroj>
- [9] UNIVERZITA J.E. PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM. KATEDRA CHEMIE. Výroba a použití vodíku. 112 s. Dostupné z: [http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/VODIK\\_vyroba\\_a\\_pouziti.pdf](http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/VODIK_vyroba_a_pouziti.pdf)
-

- 
- [10] Vodík. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13. 8. 2003, last modified on 19. 5. 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk>>.
- [11] NAVRÁTIL, I. *Vodík – palivo budoucnosti*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2006. 29 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Vondruška, CSc.
- [12] Merlin 100 UL - TechProAviation. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://techproaviation.cz/katalog-detail/letadla/merlin-100-ul?lang=cs>
- [13] ZELENÝ, M.: *Nizkoteplotní palivové články – bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Peter Barath, PhD.
- [14] Dynamics of the Polymer Electrolyte Fuel Cell: Experiments and Model – based Analysis, A dissertation submitted to the SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH for the degree of Doctor of Technical Sciences presented by PAUL HENDRIK RODATZ Dipl. Masch. – Ing. ETH born 18. 9. 1973 Germany accepted on the recommendation of Prof. Dr. L. Guzzella, examiner Prof. Dr. A. Wokaun, co – examiner Prof. Dr. A. Stefanopoulou, co – examiner
- [15] Měnič. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 24. 6. 2007, last modified on 23. 5. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Bni%C4%8D>>.
- [16] Diskuse.Elektrika.cz [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Existují elektromotory s poměrem 1kW/1kg?. Dostupné z WWW: <<http://diskuse.elektrika.cz/index.php/topic,16116.0.html>>.
- [17] PML Flightlink [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Hi-Pa Drive. Dostupné z WWW: <[http://www.pmlflightlink.com/motors/hipa\\_drive.html](http://www.pmlflightlink.com/motors/hipa_drive.html)>.
- [18] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Skladování vodíku II. [online]. 2007, s. 6 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/414-skladovani-vodikii>
-



- [19] HBank Technologies - Fuel Cell application. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.hbank.com.tw/fc/0220.html>
- [20] Hi-Pa Drive. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.hbank.com.tw/fc/0220.html>
- [21] Mentor MP - DC Drive. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.emersonindustrial.com/en-EN/controltechniques/products/dcdrives/mentormp/Pages/default.aspx>

---

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

AFC	akronym anglického výrazu Alkaline Fuel Cell, česky alkalický palivový článek
atm.	atmosféra, jednotka tlaku (101,3kPa)
FC	akronym anglického výrazu Fuel Cell (doslovně přeloženo – palivová buňka), česky palivový článek (PČ)
liq.	označení pro látku v kapalném skupenství (liquid)
max.	maximální, maximum
MCFC	akronym anglického výrazu Molten Carbonate Fuel Cell – česky palivový článek s taveninou uhličitánů
MEA	akronym anglického výrazu Membrane Electrode Assembly – česky uspořádání membrány a elektrod
min	minuta
např.	například
ohm.	ohmický (odporový)
PAFC	akronym anglického výrazu Phosphoric Acid Fuel Cell – česky palivový článek s kyselinou fosforečnou
PČ	palivový článek
PE	akronym výrazu polymerní elektrolyt (Polymer Electrolyte)
PEM	akronym anglického výrazu Polymer Electrolyte Membrane, též Polymer Electrode Membrane, někdy též Proton Exchange Membrane. Česky nejčastěji polymerní membrána, polymerní elektrodová membrána či polymerní elektro–membrána nebo protonová výměnná membrána.
PEM–FC	kombinace akronymů PEM a FC (česky palivový článek s polymerní membránou)



---

tzv.	takzvaný
$c$ [ $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ]	látková koncentrace
$e$ [C]	elementární elektrický náboj (náboj elektronu): $e = 1,602\cdot 10^{-19}$ C
$E_0$ [V]	standardní elektrodový potenciál – elektrický potenciál půlčlánku při standardních podmínkách ( $T = 273,15\text{K}$ , $p = 101,3\text{kPa}$ , $c = 1\text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ )
$E$ [V]	elektrický potenciál
$F$ [ $\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]	Faradayova konstanta: $F = 96\,485,339\text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$
$G$ [ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]	Gibbsova volná energie
$g$	označení pro plynné skupenství látky (gas)
$H$	[ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ] entalpie
$i$ [ $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	proudová hustota (česky se většinou značí A, ale s ohledem na výchozí literaturu autoři zachovali původní značení)
$K$	stupeň Kelvinův
$l$	označení pro látku v kapalném skupenství, též liq (liquid)
$n$ [-]	počet elementárních elektrických nábojů (elektronů) vyměněných v průběhu oxidoredukční reakce podle chemické rovnice dané reakce
$Q$ [C]	elektrický náboj
$T$ [K]	absolutní teplota
$T\cdot\Delta S$	změna entropie při dané absolutní teplotě [ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]
$\alpha_c$ [-]	koeficient přenosu elektronů
$\eta$ [% , - ]	účinnost
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsiovy stupnice
$\Delta G$	změna Gibbsovy volné energie [ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

---





$\Delta H$  změna entalpie [ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

$\Delta S$  změna entropie [ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]



## 11 SEZNAM PŘÍLOH

Konstrukční výkresy projektu.