

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Martin Tomáš; Pavel Novotný

Poznatky ze současného vývoje vodíkových palivových článků

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 58 (2013), No. 1, 28–38

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/143256>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2013

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Poznatky ze současného vývoje vodíkových palivových článků

Martin Tomáš, Pavel Novotný, Plzeň

Úvod

Již mnoho let můžeme pozorovat snahu vytvořit dostatečně výkonnou a levnou alternativu ke spalovacímu motoru nebo k zařízením využívajícím fosilní paliva. Jako efektivní způsob se jeví využití vodíkových palivových článků s polymerní membránou jako samostatných zdrojů elektrické energie, ve kterých dochází k přímé přeměně chemické energie na energii elektrickou. Parametry moderních vodíkových palivových článků s polymerní membránou umožňují jejich instalaci právě do takových zařízení, ve kterých ještě v nedávné době například spalovací motor zcela dominoval. Poslední vývoj v této oblasti ukazuje, že palivové články s polymerní membránou mají slibnou perspektivu a jejich varianty umožňují širokou škálu aplikací.

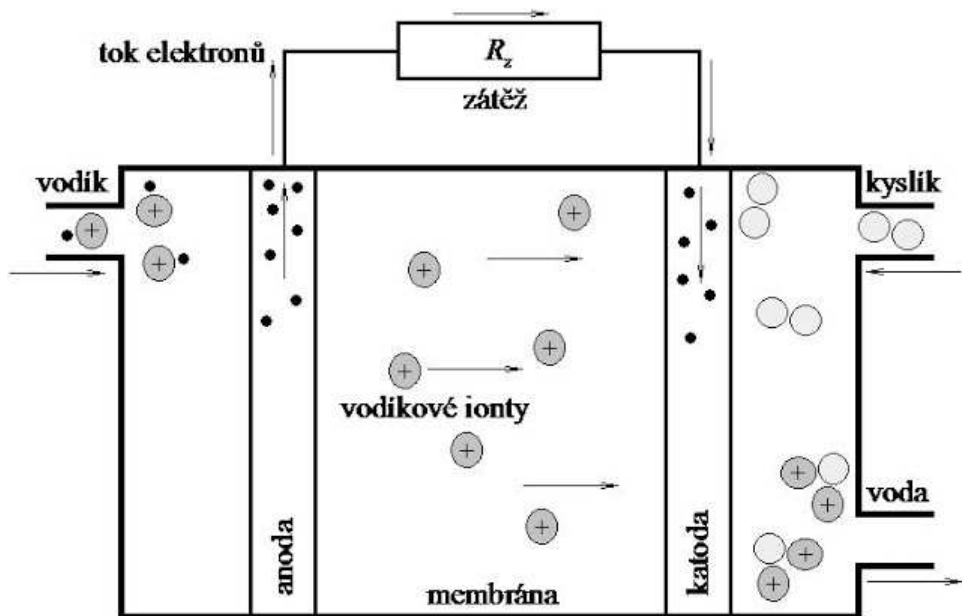
Historie palivových článků sahá až do roku 1839, kdy publikoval první teoretický popis chování palivového článku Schönbein. Na základě tohoto popisu sestrojil téhož roku první funkční palivový článek Grove, přičemž jako elektrolyt byla využita kyselina fosforečná. Poté výzkum v oblasti palivových článků stagnoval a další výraznější vývoj palivových článků se uskutečnil až v 50. letech minulého století, kdy byla ve vodíkovém palivovém článku jako elektrolyt poprvé použita iontově vodivá membrána a několik let poté byla v membráně jako katalyzátor využita platina. Tyto a další modifikace výrazně zlepšily efektivitu palivových článků a umožnily jejich využití například v kosmických modulech [15]. V současnosti jsou palivové články používány i pro provoz automobilů či domácností a v budoucnu lze tedy předpokládat optimalizaci jejich parametrů právě pro tyto aplikace.

1. Princip vodíkového palivového článku

Vodíkové palivové články fungují na zcela jednoduchém principu, který je založen na přímé konverzi chemické energie vstupujících reaktantů na energii elektrickou. Vodíkový palivový článek je tvořen dvěma elektrodami (anodou a katodou) oddělenými elektrolytem. K elektrodám je přiváděno palivo, které zde chemicky reaguje. Výsledkem těchto reakcí je „odpadní produkt“ a elektrický proud. Vodíkové palivové články s polymerní membránou využívají reakce



PhDr. MARTIN TOMÁŠ, Ph.D., Ing. PAVEL NOVOTNÝ, Nové technologie – výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, e-mail: mtomas@ntc.zcu.cz, novotnyp@ntc.zcu.cz



Obr. 1. Ilustrativní schéma vodíkového palivového článku s polymerní membránou

K anodě, kde obecně probíhá oxidace, je přiváděn vodík ve formě dvouatomových molekul. Na anodě dochází k ionizaci molekul vodíku



Tuto ionizaci si lze představit jako rozklad vodíku na vnitřní konstituenty. Výsledkem jsou tedy čtyři protony (čtyři ionty vodíku) a čtyři elektrony. Protony putují napříč elektrolytem ke katodě, ke které je přiváděn kyslík. Uvolněné elektrony směřují rovněž ke katodě, ale jejich cesta nevede přes elektrolyt, nýbrž přes elektrický obvod. Používaný elektrolyt je elektricky nevodivý, ale je velice dobře vodivý pro ionty vodíku. Na katodě, kde obecně probíhá redukce, pak dochází k reakci



Na první pohled je zřejmé, že „odpadním produktem“ je voda. Je třeba si ale uvědomit, že dalším vedlejším produktem je také teplo, které vzniká vlastní činností vodíkového palivového článku. Vodíkový palivový článek tak musí být rozšířen o systém, který zajistí provoz palivového článku ve vhodném teplotním rozsahu. Dále je třeba mít na zřeteli, že k činnosti palivového článku je nutné neustále dodávat výchozí reaktanty k elektrodám. V případě katody však může být využíván vzdušný kyslík. Složitější je situace u anody, kdy vodík potřebný k průběhu reakcí musí být uměle vyráběn.

2. Základní rozdělení palivových článků

Palivové články můžeme rozdělit podle mnoha kritérií. Jedním z nejdůležitějších parametrů je pracovní teplota. Dále je možné palivové články rozlišovat podle použitého elektrolytu. Jako elektrolyt jsou v palivových člancích využívány alkalické hydroxidy (AFC), alkalické uhličitanu (MCFC) či kyselina fosforečná (PAFC). Některé typy palivových článků jsou konstruovány tak, že místo elektrolytu je použita polymerní membrána. Tyto membrány jsou tvořeny vhodným polymerem. Některé typy membrán využívají hydrofobních vlastností oxidu zirkoničitého k efektivnímu vodnímu hospodářství. Rozlišujeme tedy palivové články s polymerní membránou (PEMFC) a s membránou tvořenou pevným oxidem (SOFC). Dále jsou ještě konstruovány palivové články fungující na bázi reakce metanolu s kyslíkem (DMFC). Je zřejmé, že existuje velký počet variant palivových článků. Každá z variant je vhodná pro jiné využití a široká paleta možných konstrukčních řešení umožňuje rozšíření palivových článků do mnoha oblastí lidského života. Jak již bylo zmíněno výše, jednotlivé typy palivových článků se rozlišují podle pracovní teploty, při které dané chemické reakce probíhají. Např. velmi perspektivní typ palivových článků s polymerní membránou pracuje v teplotním rozsahu 30–100°C, zatímco články s membránou z pevných oxidů pracují při daleko vyšších teplotách 500–1000°C. Následující tabulka ukazuje pracovní teplotu jednotlivých typů palivových článků.

Typ palivového článku	Pracovní teplota (°C)	Řádový výkon
AFC	50–200	1kW–10kW
PEMFC	30–100	1W–100kW
DMFC	20–90	1W–100W
PAFC	220	10kW–1MW
MCFC	650	100kW–10MW
SOFC	500–1000	1kW–10MW

Tab. 1. Pracovní teplota některých typů palivových článků [8]

Výkon samotného palivového článku je relativně malý, proto pro zvýšení výkonu je nutné zapojit více článků do série, do tzv. stacků (baterií). Výsledný výkon takového zařízení dosahuje hodnot i několika MW [3].

3. Termodynamický popis palivového článku

K základnímu popisu palivového článku lze použít termodynamiku, kterou lze popsat energii využitelnou pro konání práce [2], [11]. Pokud se soustředíme pouze na práci, kterou konají elektrony ve vnějším elektrickém obvodu při neměnném tlaku a teplotě, pak maximum této práce můžeme ztotožnit se změnou veličiny, která se nazývá Gibbsova volná energie a jejíž změnu označíme ΔG_f . Na vstupu do palivového článku

je tato energie nulová. V důsledku chemických reakcí dochází ke změně Gibbsovy volné energie a tuto skutečnost můžeme zapsat jako

$$\Delta G_f = G_f(\text{produkty}) - G_f(\text{reaktanty}). \quad (4)$$

Pro zjednodušení popisu přepočítáme Gibbsovu volnou energii vzhledem k látkovému množství. Budeme tedy používat hodnotu změny Gibbsovy volné energie na mol účastnících se látek, kterou označíme $\Delta \bar{g}_f$. Pokud rovnici (1) přepíšeme do tvaru



vidíme, že na každou dvouatomovou molekulu vodíku a každou produkovanou molekulu vody připadá uvolnění dvou elektronů. To zapíšeme jako

$$2N_A e = -2F, \quad (6)$$

kde N_A označuje Avogadrovo číslo, e je náboj elektronu a F je Faradayova konstanta, kterou můžeme definovat jako elektrický náboj 1 molu elektronů a číselně je rovna $F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$. Rovnice nám tedy říká, jaký náboj může konat práci ve vnějším elektrickém obvodu v případě ionizace 1 molu vodíku na anodě. Elektrická práce vykonaná elektrony v elektrickém obvodu je rovna

$$W_e = -2FU_e, \quad (7)$$

kde U_e je elektromotorické napětí palivového článku. Tuto elektrickou práci můžeme ztotožnit se změnou molární Gibbsovy volné energie [6], [14]

$$\Delta \bar{g}_f^0 = -2FU_e^0, \quad (8)$$

kde $\Delta \bar{g}_f^0$ označuje změnu molární Gibbsovy volné energie (nulový horní index ukazuje, že se jedná o hodnotu za normálního tlaku a teploty). Rovnici (8) lze přepsat do tvaru vyjadřujícího teoretickou hodnotu elektromotorického napětí

$$U_e^0 = -\frac{\bar{g}_f^0}{2F}. \quad (9)$$

Záporné znaménko na pravé straně rovnice zmizí po dosazení číselné hodnoty molární Gibbsovy volné energie, která je pro samovolné děje rovněž záporná. Teoretická hodnota elektromotorického napětí je $U_e^0 = 1,4 \text{ V}$ pro HHV (v případě LHV je $U_e^0 = 1,2 \text{ V}$). Význam zkratk LHV a HHV je vysvětlen dále v kap. 4. Efektivita chemické reakce závisí také na parciálním tlaku příslušné látky, takže elektromotorické napětí článku s parciálním tlakem musí souviset. Zavedeme tedy veličinu nazývanou aktivita látky. Pro aktivitu i -té látky platí

$$a_i = \frac{p_i}{p_0}, \quad (10)$$

kde p_0 označuje normální tlak a p_i je parciální tlak i -té látky. Nyní přepíšeme rovnici (5) do tvaru



kde řecká písmena α, β, γ označují stechiometrické koeficienty; obecně budeme označovat stechiometrický koeficient i -té látky ν_i . Ztotožněním rovnic (5) a (11) dostaneme

$$\alpha = 1, \quad \beta = \frac{1}{2}, \quad \gamma = 1. \quad (12)$$

Skutečné elektromotorické napětí palivového článku zahrnující teoretickou hodnotu elektromotorického napětí a vliv tlaku a koncentrace plynu je pak dáno vztahem [8]

$$U_e = \frac{-\Delta\bar{g}_f^0}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln \prod_i a_i^{\nu_i}, \quad (13)$$

kde R je univerzální plynová konstanta ($R = 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$) a T je termodynamická teplota. Rozepsáním aktivity reaktantů a produktů přejde vztah pro elektromotorické napětí palivového článku do tvaru

$$U_e = \frac{-\Delta\bar{g}_f^0}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{\text{H}_2\text{O}}^\gamma}{a_{\text{H}_2}^\alpha a_{\text{O}_2}^\beta}. \quad (14)$$

Po dosazení za stechiometrické koeficienty pak získáváme pro elektromotorické napětí palivového článku konečný tvar

$$U_e = \frac{-\Delta\bar{g}_f^0}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{\text{H}_2\text{O}}}{a_{\text{H}_2} \sqrt{a_{\text{O}_2}}}. \quad (15)$$

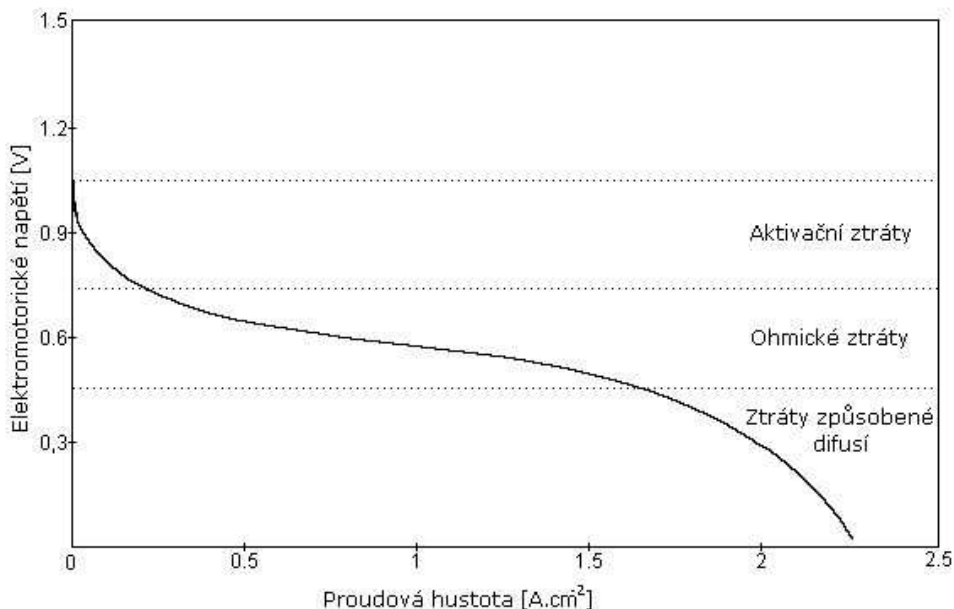
Rovnice (15) se nazývá Nernstova rovnice a její obecný tvar (13) vystihuje rozdíl teoretického elektromotorického napětí a skutečného elektromotorického napětí palivového článku [1].

4. Účinnost vodíkového palivového článku

V souvislosti se změnou Gibbsovy volné energie můžeme zavést teoreticky možnou účinnost palivového článku. Na rozdíl od mnoha jiných strojů přeměňujících energii je výpočet účinnosti palivového článku dosti složitý [13]. V ideálním případě je všechna změna molární Gibbsovy volné energie (8) přeměněna na elektrickou energii. Pro výpočet účinnosti se však používá jiná veličina. Protože základním předpokladem u palivového článku je neustálé dodávání paliva k elektrodám, nabízí se pro výpočet účinnosti entalpie, která udává, jakou tepelnou energii můžeme z dodávaného paliva získat. Teoretická účinnost palivového článku η je pak poměr mezi získanou elektrickou energií z 1 molu paliva a změnou molární entalpie $\Delta\bar{h}_f$.

$$\eta = -\frac{\Delta\bar{g}_f}{\Delta\bar{h}_f}. \quad (16)$$

V této souvislosti je vhodné zmínit, že i v případě jedné reakce (5) může být výsledná hodnota odlišná. Produktem v reakci (5) je voda, která může být ve formě páry či kapaliny. V závislosti na skupenství produktu se mění i $\Delta\bar{h}_f$ a tím i účinnost palivového



Obr. 2. Typická polarizační křivka palivového článku

článku. V případě, že je produktem vodní pára, změna molární entalpie dosahuje hodnoty $\Delta\bar{h}_f(\text{LHV}) = -241,73 \text{ kJmol}^{-1}$; v případě, že produktem je kapalná voda, změna molární entalpie dosahuje hodnoty $\Delta\bar{h}_f(\text{HHV}) = -285,84 \text{ kJmol}^{-1}$. Označení LHV plyne ze zkratky *Lower Heating Value* a označení HHV je zkratkou *Higher Heating Value*. Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami souvisí s molárním skupenským teplem, které je potřeba dodat či odebrat látce, aby změnila své skupenství. Je nutné si ale uvědomit, že reálná účinnost vodíkového palivového článku ($\sim 50\%$) je nižší než její teoretická hodnota ($\sim 80\%$), ale je stále vyšší než účinnost spalovacího motoru [16].

5. Funkční závislost elektromotorického napětí vodíkového palivového článku a proudové hustoty

Efektivita vodíkového palivového článku závisí na jeho funkční závislosti elektromotorického napětí a proudové hustoty. Závislost těchto dvou veličin udává, jak účinné jsou chemické reakce probíhající v palivovém článku. Tvar křivky rovněž ukazuje množství ztrát způsobených rozličnými jevy. Funkční závislost je nazývána mnoha termíny a asi nepoužívanějším je *polarizace*. Tento termín není vhodný z mnoha důvodů, především je spojen s naprosto odlišným jevem souvisejícím s elektrostatikou. Protože je však často používán, v dalším textu budeme pod termínem *polarizace* rozumět závislost elektromotorického napětí na proudové hustotě (tedy voltampérovou charakteristiku). Typická polarizační křivka je znázorněna na obrázku 2.

Aktivační ztráty jsou primárně způsobeny tím, že kinetika elektrochemických reakcí na povrchu elektrod je pomalá. Z obr. 2 je však zřejmé, že roste-li proudová hustota,

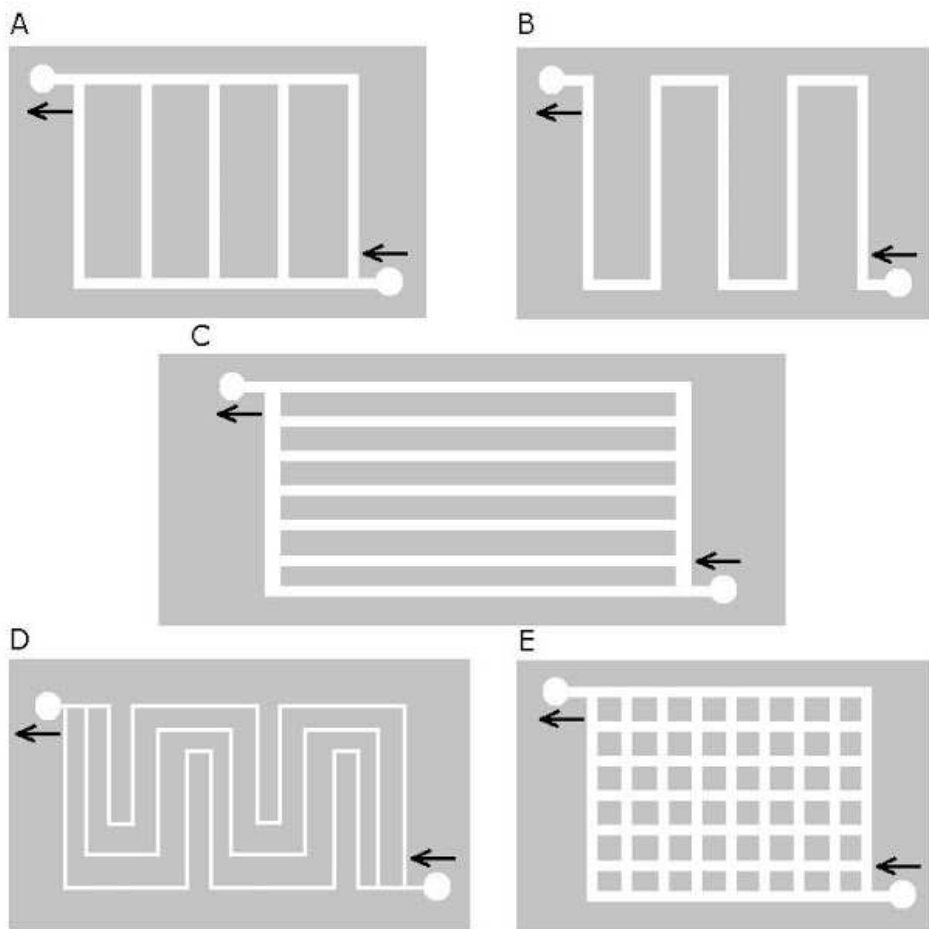
pak tyto ztráty klesají. S rostoucí proudovou hustotou dále vidíme, že z nelineární oblasti polarizační křivky přecházíme do její lineární části, která je charakterizována ohmickými ztrátami a ztrátami způsobenými průchodem nevyužitého vodíku elektrolytem. K průchodu nevyužitého vodíku dochází v určité míře i přesto, že elektrolyt je elektricky nevodivý a v ideálním případě pro reaktanty nepropustný. Ohmické ztráty jsou způsobeny odporem vůči toku iontů elektrolytem a v menší míře také odporem vůči toku elektronů elektricky vodivými komponentami palivového článku [2]. S dalším zvyšováním proudové hustoty dosáhneme v polarizační křivce oblasti, která odpovídá ztrátám způsobeným difuzí. Tyto ztráty se projevují tehdy, když dochází k velmi rychlému spotřebování reaktantu elektrochemickou reakcí na povrchu elektrody. Přesněji řečeno, je třeba mít na zřeteli, že koncentrace reaktantu na povrchu elektrody závisí nepřímo úměrně na proudové hustotě; s rostoucí proudovou hustotou se tedy snižuje povrchová koncentrace reaktantu. Může nastat i extrémní situace, kdy proudová hustota dosáhne takové hodnoty, při které je povrchová koncentrace reaktantu nulová, tzn. že reaktant je spotřebován dříve, než může dosáhnout povrchu elektrody [2]. Taková hodnota proudové hustoty se nazývá mezní proudová hustota. Palivový článek pak není schopen produkovat více, než je mezní proud (mezní proudová hustota), protože není dostatek reaktantů na ploše elektrody.

6. Současné trendy ve vývoji vodíkových palivových článků

V předešlé části textu jsme ukázali, že samotný teoretický popis vodíkového palivového článku není náročný a vychází ze základních termodynamických zákonitostí. Nyní však svoji pozornost obrátíme k aktuálně nejčastěji řešeným problémům ve výzkumu vodíkových palivových článků.

Důležitým předpokladem vysoké účinnosti palivového článku je maximální využití dodávaného paliva. Aby se palivo v článku účastnilo chemických reakcí, je nutné vytvořit takové uspořádání elektrod, které zajistí, že se reaktanty dostanou do styku s anodou a katodou. Pro tyto účely se konstruují speciálně tvarované desky, které slouží jako elektricky vodivé komponenty palivových článků a zároveň svým tvarem umožňují jednoduché dodávání reaktantů a separaci produktů. Pro tyto desky se ustálil termín *bipolární desky*. Design bipolárních desek je jedním z důležitých předmětů současného výzkumu. Palivové články využívají několika základních tvarů bipolárních desek [18]. Tyto tvary jsou znázorněny na obrázku 3. U každého typu je šipkami naznačen směr toku reaktantů (šipka vpravo dole) a produktů (šipka vlevo nahore). Tvar označený jako A se nazývá *paralelní*, tvar B je označován jako *vlnitý*. Pro tvar C se obvykle užívá termínu *prodloužený paralelní*, zatímco tvar D se označuje *vlnitý paralelní*. Můžeme se setkat i s tvarem E, který se nazývá *mřížka*. Protože je výkon samotného palivového článku relativně malý, bývá zapojeno mnoho těchto článků do série. Současný výzkum v oblasti bipolárních desek je zaměřen především na tvorbu velmi tenkých a levných desek. Tenké desky umožňují umístění většího počtu palivových článků do daného objemu, a tedy přispívají ke zvýšení výkonu takového zařízení. Důležitým parametrem je i cena, a proto jsou v současné době používány dobře dostupné materiály, např. nerezová ocel, grafit a uhlíkové kompozity.

Značným problémem u konstrukce bipolárních desek je odvádění produkované vody. Situaci lze řešit porézními elektrodami, kterými jsou vedeny reaktanty pod tla-



Obr. 3. Základní design bipolárních desek

kem. Při průchodu reaktantů elektrodou je rovněž vytlačována i produkovaná voda, kterou lze poté z palivového článku odvést. Tento systém se ukazuje jako velice efektivní. Je však třeba poznamenat, že produkovaná voda je často potřebná pro jiné části palivového článku, především pro polymerní membránu. Právě voda, resp. vlhkost, zaručuje dobrou iontovou vodivost membrány.

Pro zvýšení efektivity elektrochemických reakcí se používá jako katalyzátor platina. Dlouhou dobu bylo potřeba využívat relativně velké množství platiny pro výrobu kvalitních elektrod ($0,8 \text{ mg/cm}^2$ v roce 2005). V současnosti je toto množství výrazně menší ($0,3 \text{ mg/cm}^2$ v roce 2010) a stejně kvalitní elektrody vyžadují použití pouze malého množství platiny [17]. Platina se nanášela na elektrody nátěrem nebo sprejováním (katalytická vrstva). Dále byly využity vlastnosti nanočástic platiny, což vedlo k ještě výraznějšímu snížení celkového množství tohoto kovu v palivovém článku [17].

V minulosti tvořila cena platiny výraznou část celkové ceny palivového článku. Proto stále přetrvává názor, že podstatnou část nákladů na výrobu palivového článku tvoří právě platina. Současné palivové články však vyžadují výrazně menší množství tohoto drahého kovu, než tomu bylo v minulosti, a proto je podíl ceny platiny na celkové ceně palivového článku nižší, než se obecně předpokládá. Čistá platina navíc nedosahuje tak dobrých výsledků jako její slitiny [10], [17]. V moderních palivových člancích se tak setkáváme především se slitinami platiny s chromem, manganem, železem, kobaltem, niklem či titanem [12], [17]. Stále však přetrvává problém s degradací katalytické vrstvy v důsledku provozu palivového článku [7].

Použití platiny jako katalyzátoru v chemických reakcích se ukázalo jako velice šťastné. Jedná se o velmi stabilní kov, který si zachovává své vlastnosti v příznivém teplotním rozsahu. Jedním z problémů, jenž se vyskytl v souvislosti s použitím platiny, je reakce platiny s oxidem uhelnatým, který se vyskytuje ve velmi malém množství v palivu dodávaném do palivového článku. Především u článků využívajících jako paliva metanol či jiné uhlovodíky má oxid uhelnatý významný vliv na životnost článku. Tento problém se podařilo částečně odstranit použitím slitiny platiny a ruthenia. V blízkosti elektrody pak dochází k několika chemickým reakcím a oxid uhelnatý se mění na oxid uhličitý. Ke stejnému účelu se kromě ruthenia používá rovněž i palladium a rhodium.

7. Využití vodíkových palivových článků

Na vodíkové palivové články se často nahlíží jako na alternativu k zařízením využívajícím ke svému provozu fosilní paliva. Značná pozornost je soustředěna na využití palivových článků pro výrobu elektrické energie. Během provozu produkuje palivový článek – kromě elektrické energie – teplo a vodu, což je markantní rozdíl oproti například spalovacím motorům. Teoretická účinnost palivových článků je navíc při srovnání se spalovacími motory vyšší [8], [16]. Soustavu palivových článků lze navrhnout tak, aby výsledný výkon dosahoval relativně vysokých hodnot. Některé sestavy palivových článků s polymerní membránou dosahují výstupních výkonů až 100 kW (sestava HyPM od firmy Hydrogenics) [5]. Palivové články jsou ve své podstatě samostatné zdroje elektrické energie a mohou být konstruovány jako stacionární nebo mobilní zdroje elektrické energie v širokém spektru možných výkonů (tabulka 1). Další možností je zařadit palivové články do elektrické sítě tak, aby kompenzovaly prudké výkyvy ve výrobě elektrické energie. Jednou z variant je rovněž využití palivových článků jako záložního zdroje elektrické energie. Zde je nutné poznamenat, že rozběh článku není okamžitý a plného výkonu takové zařízení dosahuje až po několika minutách. Poskytovaný výkon ale může být velmi vysoký. Celý systém je možné dále doplnit o elektrolyzátor a zařízení pro uskladnění vodíku. V případě normálního napájení z elektrické sítě pak elektrolyzátor vyrábí vodík do zásobníku, který se začne vyprazdňovat až v případě odpojení systému od elektrické sítě.

Dalším způsobem využití vodíkových palivových článků s polymerní membránou je jejich montáž do automobilů. Výhodou oproti spalovacím motorům je jejich bezhlučný provoz, minimální emise a vyšší účinnost [16]. Je potřeba zdůraznit, že o nulových emisích mluvíme pouze v souvislosti s vlastním provozem palivového článku. Vodík dodávaný do palivového článku je obvykle vyráběn elektrolyzou, při které se

spotřebovává elektrická energie vyrobená zdrojem, jehož emise mohou být značné. Nabízí se však spojení výroby vodíku s fotovoltaickou či větrnou elektrárnou [9], [4]. Při nepříznivých povětrnostních podmínkách by pak kontinuální výrobu elektrické energie zajišťoval palivový článek, který by spotřebovával vodík vyrobený ostatními zdroji elektrické energie.

V případě automobilů můžeme rozeznat dvě varianty způsobu dodávání paliva do vodíkového palivového článku. Jednou z možností je výroba vodíku přímo v automobilu z vhodné látky (metanol). Dalším způsobem je dodávání vodíku uskladněného v nádobě uvnitř automobilu. Právě nádrže s vodíkem bývají často považovány za problematické, protože vodík společně se vzduchem tvoří vysoce výbušnou směs ve velkém rozsahu koncentrací. Tyto námitky je však možné vztáhnout na jakékoliv palivo. Vodík je navíc lehký plyn, který v případě úniku velmi rychle stoupá vzhůru do atmosféry. Nedrží se tedy v blízkosti poškozené nádrže. Samotnou nádrž je možné umístit v automobilu tak, aby se výrazně snížilo riziko jejího poškození v případě havárie.

Pro chlazení systému je potřeba využít médium, které bude odolávat teplotním výkyvům. Palivový článek produkuje odpadní teplo a je třeba jej chladit. K tomuto účelu se využívá deionizovaná voda. Při použití palivových článků v automobilech můžeme předpokládat, že okolní teplota často klesne pod 0°C . Je tedy nutné použít jako chladicí médium látku, která si i v nízkých teplotách zachová vlastnosti potřebné k provozu palivového článku (například směs etylenglykolu a vody). Voda produkovaná během reakcí uvnitř palivového článku musí být rovněž odstraněna. Před odstavením článku se místo paliva do systému přivede dusík, který produkovanou vodu z článku odstraní. Voda tak opouští palivový článek a v případě nízkých teplot nehrozí jeho poškození.

Závěr

Vodíkové palivové články jsou schopny konkurovat spalovacím motorům a zařízením využívajícím fosilní paliva v mnoha ohledech. Protože není výroba vodíkových palivových článků významně rozšířena, cena těchto zařízení je v současnosti relativně vysoká. Lze očekávat, že postupným vývojem a zapracováním nejnovějších technologií dojde k postupnému snížení ceny, které umožní rozšíření vodíkových palivových článků do mnoha aplikací. Výhody vodíkových palivových článků a bohužel i některé výše zmíněné limity palivových článků jsou zcela zřejmé. Budoucí rozvoj těchto zařízení měnících chemickou energii na energii elektrickou však jistě zasáhne do našeho každodenního života.

Poděkování. Rádi bychom poděkovali Ivanovi Krakovskému a recenzentovi PMFA za velmi užitečné připomínky. Tento výsledek vznikl v rámci projektu CENTEM, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0088, který je spolufinancován z ERDF v rámci programu MŠMT OP VaVpl.

L i t e r a t u r a

- [1] ATKINS, P.: *Physical chemistry*. Oxford University Press, Oxford, 2006.
- [2] BARBIR, J.: *PEM fuel cells: theory and practise*. Academic Press, Waltham, 2005.
- [3] *DFC3000* [online]. DFC3000. (04-2012). [cit. 3.1.2013]. Dostupné z: <http://www.fuelcellenergy.com/files/DFC3000SPEC-5-12.pdf>
- [4] *Hydrogen production roadmap* [online]. U.S. Department of Energy. (01-2009). [cit. 3.1.2013]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_production_roadmap.pdf
- [5] *HyPM Fuel Cell Power Modules* [online]. Hydrogenics. (03-2010). [cit. 3.1.2013]. Dostupné z: <http://www.h2fc-fair.com/hm10/images/pdf/hydrogenics02.pdf>
- [6] KJELSTRUP, S., BEDEAUX, D.: *Non-equilibrium thermodynamics of heterogeneous systems*. World Scientific Publishing, Singapore, 2008.
- [7] LANDSMAN, D. A., LUCZAK, F. J.: *Catalyst studies and coatings technologies*. Handbook of Fuel Cells: Fundamental Technology and Applications, roč. 3, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 2003.
- [8] LARMINIE, J., DICKS, A.: *Fuel cell system explained*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 2003.
- [9] LEMUS, R. G., DUART, J. M.: *Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies*. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2007), 3929–3936.
- [10] LI, H., KNIGHTS, S., SHI, Z., VAN ZEE, J., ZHANG, J.: *Proton exchange membrane fuel cells – contamination and mitigation strategies*. CRC Press, Boca Raton, 2010.
- [11] MARŠÍK, F., DVOŘÁK, I.: *Biotermodynamika*. Academia, Praha, 1998.
- [12] MEPSTED, G. O., MOORE, J. M.: *Performance and durability of bipolar plate materials*. Handbook of Fuel Cells: Fundamental Technology and Applications, roč. 3, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 2003.
- [13] NĚMEC, T., MARŠÍK, F., MIČAN, O.: *The characteristic thickness of polymer electrolyte membrane and the efficiency of fuel cell*. Heat Transfer Engineering 30 (7), 574–581.
- [14] PRIGOGINE, I.: *Thermodynamics of irreversible processes*. Interscience Publishers, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 1967.
- [15] *The fuel cell in space: yesterday, today and tomorrow* [online]. NASA. (09-1989). [cit. 3.1.2013]. Dostupné z: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19900002488_1990002488.pdf
- [16] VIELSTICH, W.: *Ideal and effective efficiencies of cell reactions and comparison to Carnot cycles*. Handbook of Fuel Cells: Fundamental Technology and Applications, roč. 3, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 2003.
- [17] WILKINSON, P. D., ZHANG, J., HUI, R., FERGUS, J., LI, X.: *Proton exchange membrane fuel cells: materials properties and performance*. CRC Press, Boca Raton, 2010.
- [18] WIND, J., LACROIX, A., BRAUENINGER, S., HEDRICH, P., HELLER, C., SCHUDY, M.: *Metal bipolar plates and coatings*. Handbook of Fuel Cells: Fundamental Technology and Applications, roč. 3, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 2003.