

Gymnázium Přírodní škola, o.p.s.  
Profilová práce — třída Lambda  
Vyšší stupeň studia  
2017/2018

Ondřej Mišina

**Měření volt-ampérové  
charakteristiky palivových článků**

Vedoucí práce: Mgr. František Tichý

Datum odevzdání: 18. 8. 2018

## Abstrakt

V této práci byl sestaven měřicí obvod pro měření volt-ampérové charakteristiky palivových článků s polymerní iontoměničovou membránou. Tento obvod byl použit pro měření volt-ampérové charakteristiky s ventilátorem foukajícím na článek a bez něj. Byla identifikována ohmická oblast a oblast aktivační polarizace. Ventilátor zvýšil výkon článku o 14%.

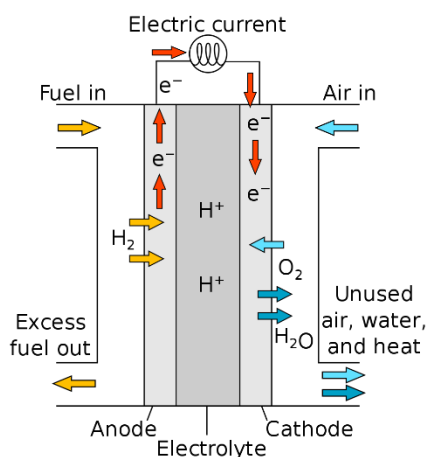
# Obsah

|                |    |
|----------------|----|
| Úvod .....     | 1  |
| Metodika ..... | 5  |
| Výsledky ..... | 6  |
| Diskuze.....   | 9  |
| Závěr .....    | 11 |

# Úvod

Dostal jsem příležitost spolupracovat v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži s Alešem Douckem, který se zabývá vývojem vodíkových technologií. Ty nejspíše budou nedílnou součástí energetického systému budoucnosti, protože neprodukují téměř žádné emise a umožňují efektivní přeměnu chemické energie na elektřinu. Proto si myslím, že je důležité tyto technologie rozvíjet a jsem rád, že jsem měl možnost být alespoň trochu součástí výzkumu.

Palivové články jsou technologií umožňující získávání elektrické energie s vysokou účinností a nízkými emisemi. Mohou najít uplatnění jako malý zdroj energie, nahradit standardní baterie nebo fosilní paliva v automobilovém průmyslu. Přestože je tato technologie známá přes sto let, zatím byla ve větší míře použita pouze ve speciálních aplikacích jako vesmírný nebo podmořský průzkum.



Obr. 1 – schéma palivového článku s polymerní iontoměničovou membránou

Palivový článek je zařízení, které transformuje chemickou energii přímo na elektrickou energii. Skládá se ze dvou elektrod, které jsou oddělené elektrolytem. Elektrody jsou typicky porézní a obsahují katalyzátor. K elektrodám je přiváděno palivo a okysličovadlo. Většinou je to vodík na anodě a kyslík na katodě (viz Obr. 1). Na elektrodách se vytváří třífázové rozhraní - elektroda, elektrolyt a reagenty oxidačně

redukční reakce. Existuje několik typů palivových článků, které se liší použitým elektrolytem a/nebo reakcemi na elektrodách. Například u palivových článků s polymerní iontoměničovou membránou jako elektrolytem na anodě probíhá reakce  $H_2 = 2H^+ + 2e^-$ . Vodíkové ionty procházejí elektrolytem na katodu. Uvolněné elektrony jsou vedeny vnějším obvodem, kde se dají využít na elektrickou práci. Na katodě se potom vodíkové ionty, elektrony a kyslík slučují na vodu podle rovnice  $2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$ .

Elektrody musí umožnit kontakt plynných reaktantů, kapalného elektrolytu a pevné elektrody. Proto jsou elektrody porézní. V pórech se totiž vytváří tenký smáčivý film elektrolytu, skrz který může difundovat plyn a reagovat na povrchu elektrody s kapalinou. Elektrody proto mají co největší povrch. Ve většině palivových článků se využívá platina jako katalyzátor.

Podle typu elektrolytu se palivové články dělí na:

- AFC – Alkaline Fuel Cell

Elektrolytem je 35% až 85% roztok KOH. Jako palivo se používá  $H_2$ , pracují při teplotě 70 - 220 °C. Na anodě probíhá reakce  $H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$  a na katodě  $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$ . Výhodou je dobrý výkon při použití vodíku jako paliva a možnost použití širokého spektra katalyzátorů.

- PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell

Elektrolytem je kyselina fosforečná. 150 - 200 °C.

- PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell/ Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Pracují při teplotě cca 80 - 120 °C. Jejich výhodou je pevný elektrolyt, který zjednodušuje údržbu. Pracují při nízké teplotě, a proto mají rychlý start, což umožňuje jejich využití v automobilovém průmyslu.

- MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell

Elektrolytem je tavenina alkalických uhličitů. Pracují při vysoké teplotě 600 - 700 °C. Při této vysoké teplotě nejsou potřeba drahé kovy jako katalyzátor. Umožňují využití více paliv jako H<sub>2</sub>, CO nebo zemní plyn. Jejich výhodou je vysoká účinnost.

- SOFC – Solid Oxide Fuel Cell

Tyto palivové články pracují při relativně nejvyšších teplotách 700 - 1000 °C. Kvůli tomu ale snadno korodují a trvá dlouho, než nastartují. Na druhou stranu ale mají velmi dobrou účinnost a na rozdíl od PEMFC mohou využít i jiných katalyzátorů než platiny. Jako palivo mohou použít H<sub>2</sub>, CO nebo zemní plyn. Pokud využívají jako palivo vodík, na anodě probíhá reakce  $H_2 + O_2^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$  a na katodě  $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ . Elektrolyt je pevný, obvykle z Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nebo ZrO<sub>2</sub>, a prochází jím kyslíkové ionty.

Aby mohly palivové články využívat i jiné palivo než vodík, využívá se reformování. Za vysokých teplot se parciální oxidací z původního paliva vytvoří vodík a to buďto mimo článek, nebo i přímo v článku (tzv. vnitřní reforming). Toho se využívá hlavně u vysokoteplotních článků, protože se palivo na vysokou teplotu stejně musí zahřát, tak se na reformování nespotřebuje příliš mnoho energie.

U vysokoteplotních článků, především u SOFC, mají výstupní plyny dostatečnou teplotu, aby je bylo možné použít v plynové turbíně, čímž se ještě zvýší účinnost zařízení.

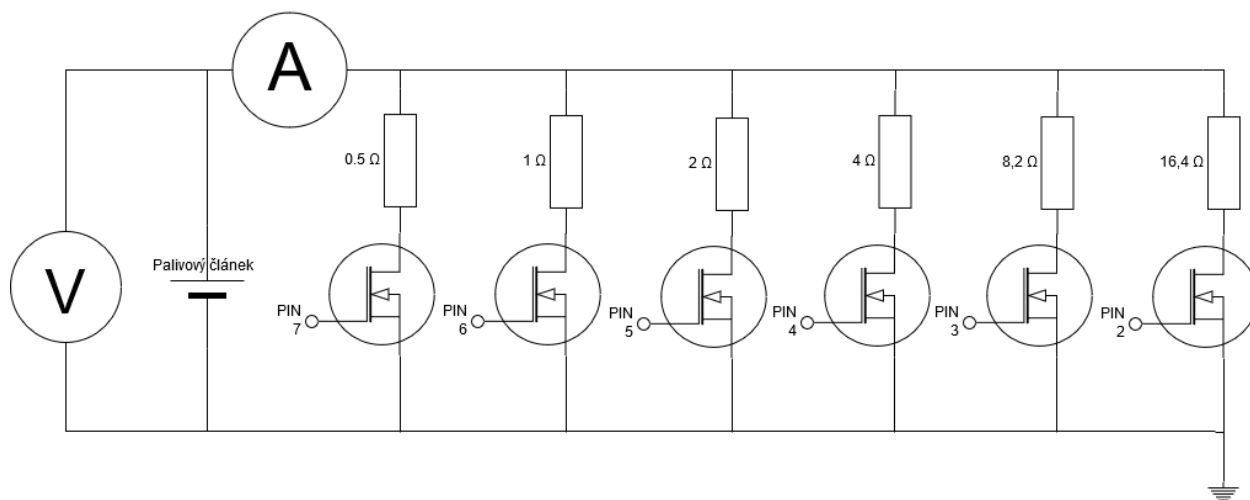
Palivové články mají oproti konvenčním zdrojům elektřiny tyto výhody:

- vysokou účinnost
- nízké emise
- vysoké rozmezí výkonů
- nehlukný provoz

V této práci byly měřeny palivové články typu PEMFC. Konkrétně byla měřena volt-ampérová charakteristika, protože ukazuje důležité vlastnosti zdroje. Například maximální výkon a při jakých proudech nastává nebo vnitřní odpor zdroje. K měření byl použit mini počítač Arduino Uno, který umožnil řízení experimentu a zaznamenávání dat.

PEMFC mají maximální teoretické napětí cca 1,2 V. Reálné napětí je nižší kvůli ohmickým ztrátám a ztrátám způsobených aktivační a reakční polarizací. Tyto ztráty se mění s proudovou hustotou. Ohmické ztráty se dají vyjádřit vztahem  $U = a - bI$ . Parametry  $a$  a  $b$  se dají určit experimentálně. Ke koncentrační polarizaci dochází při vysokých proudových hustotách, protože reaktanty nemůžou dostatečně rychle difundovat k místu reakce. Obecně volt-ampérové charakteristika palivových článků vypadá takto: Při nízkých proudových hustotách napětí s proudem prudce klesá, poté se pokles zpomalí a začne být ohmický až od proudových hustot, při který začíná koncentrační polarizace, potom zase rychleji klesá až k nule.

## Metodika



Obr. 2

K měření použit obvod znázorněný na *Obr. 2*. Piny 2 až 7 jsou výstupy minipočítače Arduino, kterými je regulována zátěž.

Napětí bylo měřeno na analogovém vstupu čipu ATmega328P, který je součástí minipočítače Arduino, s rozlišením 3,23 mV. Proud byl měřen pomocí proudového senzoru ACS712 jehož analogový napěťový výstup byl také měřen na vstupu čipu ATmega328P. Jako zátěž byly použity odpory spínané unipolárními transistory. Celkový rozsah byl cca 16,4  $\Omega$  až 0,25  $\Omega$ .

Byl měřen palivový článek typu PEMFC o ploše cca 4 cm<sup>2</sup>, který byl nepřetržitě napájen vodíkem z elektrolyzéru a vzdušným kyslíkem. Článek byl měřen při teplotě cca 25 °C s ventilátorem foukajícím na článek a bez něj.

Před měřením byl palivový článek několik minut připojen k zátěži, aby se zvlhčila membrána.



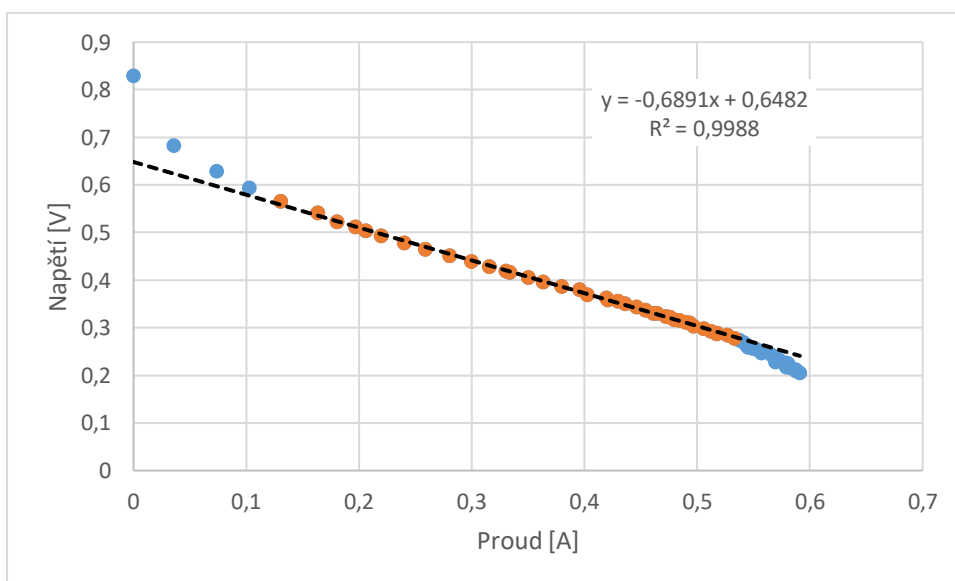
Jeden cyklus měření probíhal takto:

- 5s - měřený zdroj odpojen
- 10s - sepnuta kombinace rezistorů, z toho 2s čekání na ustálení a 8s měření napětí a proudu

Tento cyklus byl proveden pro všech 64 kombinací sepnutí rezistorů a to tak, že se celkový odpor postupně snižoval.

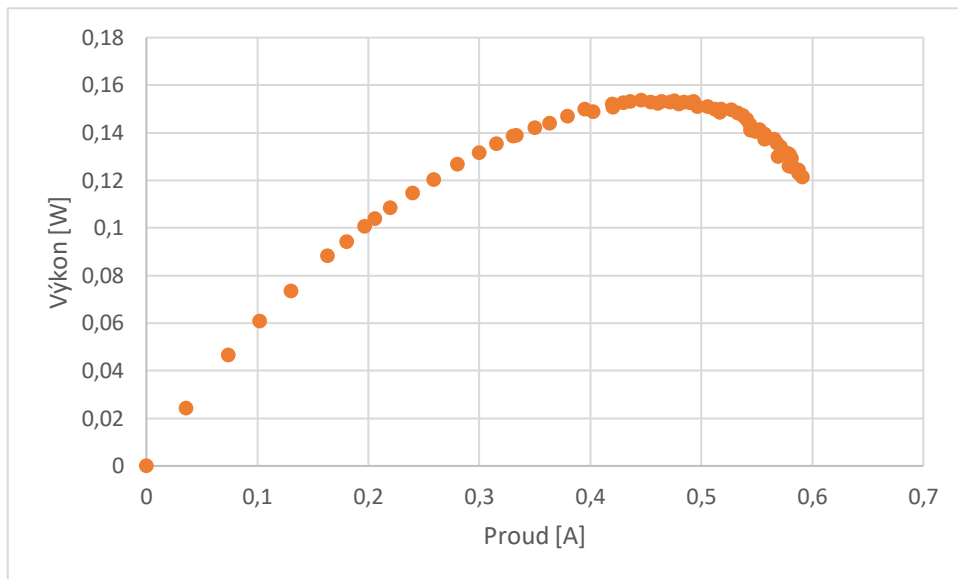
## Výsledky

Na ***Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.*** je vidět závislost napětí na proudu u palivového článku. V oblasti proudu 0- 100 mA klesá napětí nejrychleji. V oblasti znázorněné oranžově je jasně zřetelná lineární závislost. Při proudu větším než 500 mA nepatrně narůstá rychlost snižování napětí s proudem.

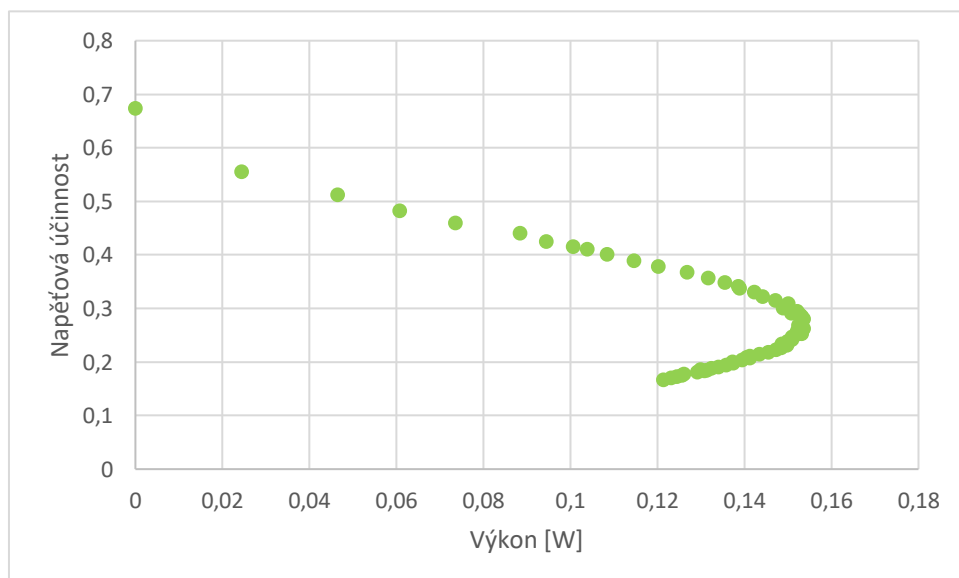


Graf 1 - palivový článek bez ventilátoru

**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** znázorňuje závislost výkonu na proudu. Výkon dosahuje maxima 154 mW při proudu 446 mA.



Graf 3- palivový článek s ventilátorem



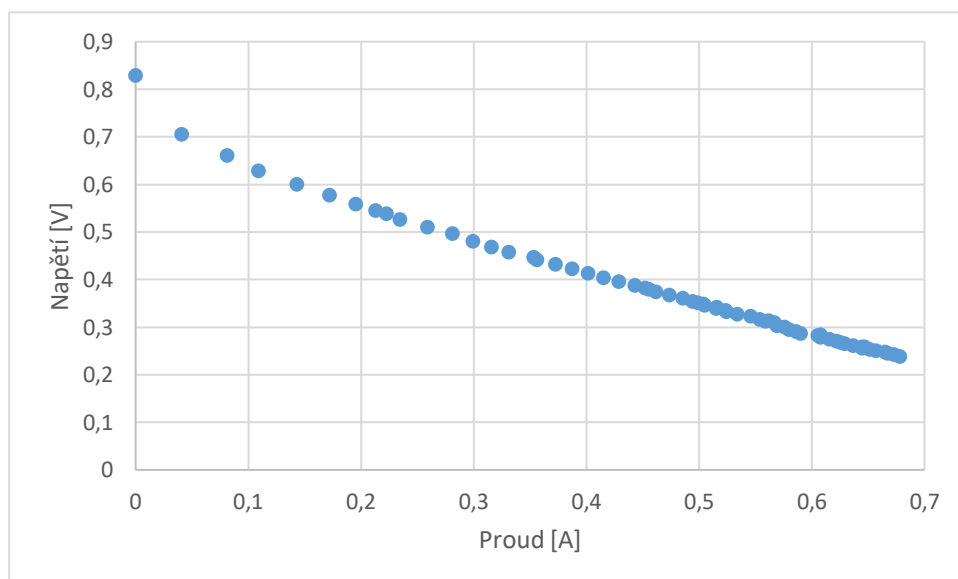
Graf 2 – palivový článek bez ventilátoru

**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** znázorňuje závislost napěťové účinnosti na výkonu.

Napěťová účinnost je definována jako  $\eta_V = \frac{\text{skutečné napětí}}{\text{teoretické napětí}}$  a je přímo úměrná účinnosti.

Při nižším proudu je vyšší účinnost. V oblasti, kde účinnost se stoupajícím výkonem klesá, je nižší proud než v oblasti, kde účinnost se stoupajícím výkonem stoupá.

Graf 4 ukazuje závislost napětí na proudu u experimentu, kdy byl použit ventilátor. Na rozdíl od experimentu bez ventilátoru je při stejných proudech o něco vyšší napětí a chybí mírné zvýšení poklesu napětí při vyšších proudech.



Graf 4 – palivový článek s ventilátorem

## Diskuze

Ve výsledcích je vidět jak oblast, kde dochází ke ztrátám kvůli aktivační polarizaci, tak i ohmická oblast, kde napětí klesá lineárně s proudem. Očekávaný pokles napětí při vysokých proudových hustotách způsobený koncentrační polarizací není jasně rozeznatelný. Pouze u experimentu, kde nebyl použit ventilátor, je vidět mírné zrychlení poklesu napětí. Lze předpokládat, že pokud by byly měřeny i vyšší proudy, koncentrační polarizace by se projevila více. U experimentu, kde byl použit ventilátor, není vidět žádné zrychlení poklesu napětí. To lze vysvětlit tak, že zrychlení poklesu napětí u experimentu bez ventilátoru bylo způsobené nedostatkem kyslíku. Tím, že ventilátor obměňoval vzduch kolem článku, se kyslík mohl snáze dostat na elektrodu. Koncentrační polarizace by nejspíše nastala, ale při vyšších proudech, než jaké byly měřeny. Dostatek kyslíku u experimentu s ventilátorem zvýšil maximální výkon palivového článku o 14%.

Graf závislosti výkonu na proudu má přibližně předpokládaný tvar. Maximální výkon je při proudu cca 450 mA. Protože s rostoucím proudem klesá účinnost, znamená to, že provozovat tento článek při proudech větších než cca 450 mA je neefektivní. Stejného výkonu lze totiž u tohoto článku dosáhnout s větší účinností při nižších proudech.

Experiment potvrdil teoretické předpoklady a předchozí měření.

Při experimentu nebyly přesně kontrolované podmínky jako teplota. Také ventilátor neměl přesné parametry. To znamená, že experiment není možné opakovat v úplně stejných podmínkách.

Měřicí obvod by bylo možné vylepšit. V tomto experimentu nebylo možné dosáhnout vysokých proudů, takže nebyla měřena celá volt-ampérová charakteristika. Také

zvolená zátěž znamenala, že bylo málo datových bodů při nízkých proudech a možná zbytečně mnoho datových bodů při vysokých proudech. Naopak výhodou této zátěže bylo, že se měření snadno automatizovalo.

Na provedené experimenty by se dalo navázat experimenty, kde by se měnily další parametry, které mohou ovlivnit vlastnosti článku. Například různé teploty a různá kvalita paliva.

## Závěr

V této práci byl sestaven měřicí obvod pro měření volt-ampérové charakteristika PEMFC a byl vyzkoušen při experimentu. Experiment byl proveden ve dvou uspořádání, s ventilátorem foukajícím na článek a bez něj. Výsledky v celku odpovídaly předpokladu, byl vidět pokles napětí v důsledku aktivační polarizace, rozsáhlá ohmická oblast a náznak poklesu napětí v důsledku koncentrační polarizace. Ta se ale nejspíše výrazněji projevuje mimo měřené proudy. Také bylo ukázáno, že ventilátor zvýšil výkon palivového článku, což lze zdůvodnit zlepšením přísunu kyslíku. Přínosem práce je, že se měřicí obvod dá využít na další experimenty. Bylo vyzkoušeno, že dokáže zachytit důležité rysy volt-ampérové charakteristiky palivových článků.