

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum IV



Úloha č. H1

Název úlohy: Vodíkový palivový článek

Jméno: Jonáš Venc

Datum měření: 7. 10. 2025

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Použitá literatura	0–1	
Celkem	max. 17	

Posuzoval:

dne:

1 Pracovní úkoly

Pracovní úkol 1

Sestavte malý laboratorní palivový článek pomocí komerčních katalytických GDE ($0,3 \text{ mgPt cm}^{-2}$), membrány Nafion NR212 a grafitových bipolárních desek.

1. Odřízněte dva kusy GDE $2 \times 2 \text{ cm}^2$ pomocí nože a pravítka.
2. Odřízněte jeden kus membrány NR-212 $7,5 \times 4 \text{ cm}^2$.
3. Vytvořte otvory v membráně pro upínací tyče a průchod plynu.
4. Odstraňte z membrány dvě ochranné fólie.
5. Vezměte katodovou bipolární desku.
6. Položte jeden kus GDE na bipolární desku (stranou uhlíkového papíru k průtokovému poli).
7. Zakryjte membránou a zajistěte upevňovacími tyčemi.
8. Umístěte druhý kus GDE (stranou uhlíkového papíru od membrány).
9. Celý systém zakryjte anodovou bipolární deskou.

Pracovní úkol 2

Nastavte experimentální prostředí pro sestavený palivový článek, aktivujte palivový článek (break-in procedure), změřte proudovo-napěťové charakteristiky, prozkoumejte vliv zvlhčování na výkon palivového článku.

1. Upněte palivový článek pomocí pístu a nastavte upínací tlak 8 barů.
2. Připojte potenciostat pomocí 4-sondového zapojení.
3. Nastavte ohřev palivového článku a zvlhčovacích bubblérů ($70 \text{ }^{\circ}\text{C}$).
4. Propláchněte dusíkem obě strany, jak anodu i katodu (5 minut při průtoku N_2 100 sccm).
5. Přepněte na H_2 na anodové a na O_2 na katodové straně (v tomto pořadí); nastavte průtoky 50 sccm; počkejte 10 minut.
6. Nastavte napětí palivového článku; požadované napětí je v rozsahu 0,9-1V.
7. Jakmile je napětí dosaženo a stabilizováno, změřte aktuální napěťovou odezvu palivového článku.
8. Nastavte konstantní napěťovou zátěž 0,4 V po dobu 2 hodin a opakujte měření aktuální napěťové odezvy.

Pracovní úkol 3

Experiment lze provést pomocí edukačního setu FC, který simuluje reálný provoz palivových článků. U tohoto systému je použita architektura s otevřenou katodou. Zaměříme se na teplotu palivového článku. Nastavení teploty lze provést vyvážením zatížení palivového článku a výkonu ventilátoru.

1. Otevřete vodíkový ventil na tlakové láhvi (ujistěte se, že tlak je snížen na 0,5 baru).
2. Nastavte dobu čištění na 0,5 s a periodu na 60 s.
3. Nastavte výkon ventilátoru na 25%.
4. Reguluje teplotu FC - nastavením vyšších nebo nižších otáček ventilátoru (PWM Blower %) se pokuste FC stabilizovat na $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
5. Zvyšte proud na zátěži o 5 A každých 15 minut a udržujte teplotu svazku FC okolo $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
6. Při každém proudu sledujte a zaznamenávejte průměrné napětí svazku a výkon ventilátoru.
7. Dosáhněte zatěžovacího proudu 40 A a udržujte jej při stabilní teplotě po dobu 20 minut.
8. Zpomalte ventilátor, abyste dosáhli teploty $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

9. Změřte průměrné napětí.

Pracovní úkol 4

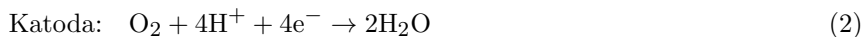
Experimenty s palivovým článkem umožňují odhadnout výkon palivového článku, a to jak v případě laboratorního článku, tak setu simulujícího reálný provoz FC. Tyto informace jsou důležité pro odhad výkonu palivových článků a také pro pochopení faktorů, které ovlivňují výkon palivových článků.

1. Načtěte experimentální data z počítače testovací stanice.
2. Zkopírujte z log souboru data ve sloupcích napětí a proudová hustota.
3. Vyneste graf napětí jako funkce proudu.
4. Najděte hustotu výkonu pro každý proud (součin proudu a napětí) a vykreslete ji.
5. Odhadněte Tafelův sklon pro kinetickou oblast.
6. Vypočítejte ohmické ztráty z lineární části grafu.
7. Odhadněte ztráty při přenosu hmoty jako rozdíl mezi očekávanou lineární závislostí proud-napětí a reálnými datovými body při proudových hustotách $> 1,5 \text{ A cm}^{-2}$.

2 Teoretická část

Vodíkový palivový článek (FC, *fuel cell*) je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii paliva, v našem případě vodíku, přímo na elektrickou energii, teplo a vodu. Základní konstrukční prvky palivového článku tvoří plynové difúzní elektrody (GDE), protonově vodivá membrána (PEM) a bipolární desky.

Na anodě probíhá katalytická oxidace vodíku (reakce HOR), při níž se molekula H_2 štěpí na protony a elektrony. Elektrony jsou vedeny vnějším obvodem ke katodě, zatímco protony procházejí protonově vodivou membránou, kde reagují s kyslíkem (reakce ORR) za vzniku vody:



Tímto procesem vzniká elektrické napětí, jehož hodnota závisí na teplotě, tlaku, koncentraci plynů a vnitřních ztrátách článku. Účinnost systému může při vhodném řízení teploty a zvlhčení dosahovat až 90 %.

Pro správnou funkci je klíčové zvlhčování membrány, protože protonová vodivost polymeru silně závisí na obsahu vody. Plynové difúzní elektrody zajišťují transport plynů a odvod vznikající vody, zatímco bipolární desky z grafitu nebo kovu zajišťují elektrický kontakt, distribuci plynů a odvod tepla.

Charakteristiku článku lze popsat polarizační křivkou, která vyjadřuje závislost napětí na proudu. Rozlišujeme tři oblasti:

- **Aktivační oblast** – dominuje přepětí dané kinetikou elektrodových reakcí. Je popsána Tafelovou rovnicí:

$$\eta = b \log i, \quad (3)$$

kde b je Tafelův sklon charakterizující aktivitu katalyzátoru.

- **Ohmická oblast** – lineární pokles napětí odpovídá vnitřnímu odporu článku. Sklon lineární části polarizační křivky udává velikost ohmických ztrát.
- **Oblast hmotnostní (transportní) polarizace** – při vysokých proudech dochází k omezenému přenosu plynů a poklesu napětí v důsledku nedostatečné difúze kyslíku nebo akumulace vody v elektrodách.

V reálných aplikacích se často využívá architektura s otevřenou katodou, kdy proudící vzduch zajišťuje současně přívod kyslíku i odvod tepla a vody. Takové systémy jsou konstrukčně jednodušší a vhodné pro přenosné zdroje energie, například pro drony nebo malé generátory, avšak jejich řízení teploty a zvlhčení je obtížnější.

3 Výsledky a zpracování měření

3.1 Sestavení článku a měření

Na základě pracovního úkolu 1 z [1] jsme vyrobili vodíkový palivový článek. Ten jsme umístili pomocí pístu do laboratorního stativu. Podle pracovního úkolu 2 jsme proměřili tento článek.

Podle pracovního úkolu 3 jsme použili edukační set FC, který simuluje reálný provoz. Podle zadání jsme měnili parametry článku a naměřené hodnoty jsme znázornili v tabulce 1. Nejprve jsme čekali, než teplota článku dosáhne 40 °C, při níž má nejvyšší efektivitu. Poté jsme postupně zvyšovali zátěž a pomocí nastavení výkonu chlazení se snažili udržet teplotu kolem 40 °C. Určili jsme maximální zatížení článku a poté snížili chlazení tak, aby teplota stoupla na 50 °C. Mimo zahřívání na začátku a na konci jsme hodnoty odečítali po ustálení parametrů jako průměrné hodnoty.

Tab. 1: Naměřené hodnoty pro různé teploty, chlazení a zátěže

Teplota (°C)	Chlazení (%)	Zátěž (A)	Napětí (V)	Výkon (W)
37	20	15.00	1.6330	25
40	20	15.00	1.5930	24
40	33	20.00	1.3570	27
40	42	25.00	1.1490	29
40	59	30.00	0.9110	27
40	67	30.93	0.8820	27
43	30	31.70	0.9060	29
46	30	30.63	0.9872	27
50	31	24.93	0.7100	18

Vidíme, že maximální hodnota proudu, kterou je tento článek schopný produkovat, je

$$I_{\max} = 31,7 \text{ A} \quad (4)$$

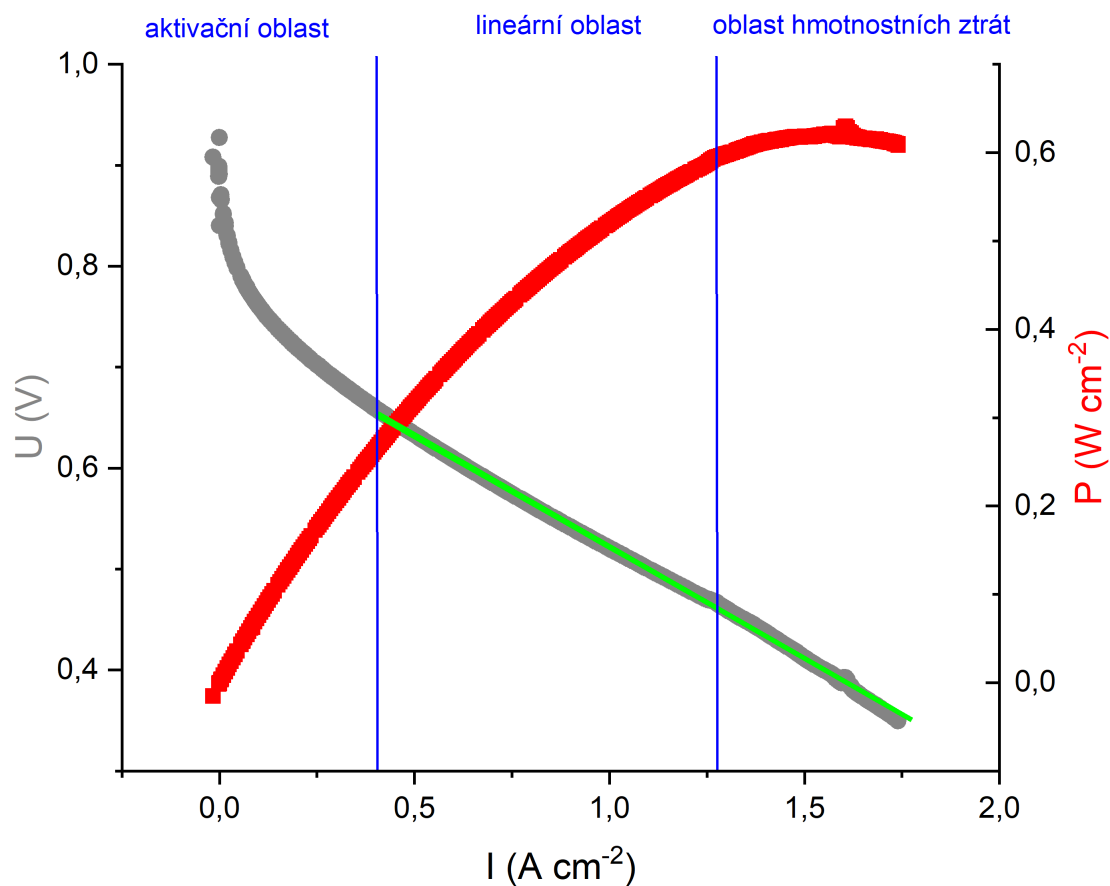
3.2 Zpracování výsledků

Na základě pracovního úkolu 4 jsme exportovali data z testovací stanice našeho vyrobeného článku. V grafu 1 je znázorněna polarizační křivka a závislost výkonové hustoty na proudové hustotě. Polarizační křivku (označena šedě) můžeme rozdělit do tří oblastí, jak je znázorněno na obrázku modře.

Pro kinetickou (aktivační) oblast jsme odhadli Tafelův sklon na základě fitu Tafelovy rovnice (3) podle [2]. Tento fit je znázorněn v grafu 2. Na osu x jsme vynesli logaritmus z naměřeného proudu a na osu y naměřené přepětí. Tuto závislost jsme fitovali lineární regresí $y=ax+b$ se získanými parametry:

$$a = -0,1 \text{ V cm}^2 \text{ A}^{-1} \quad (5)$$

$$b = 0,6 \text{ V} \quad (6)$$



Obr. 1: Polarizační křivka a závislost výkonu

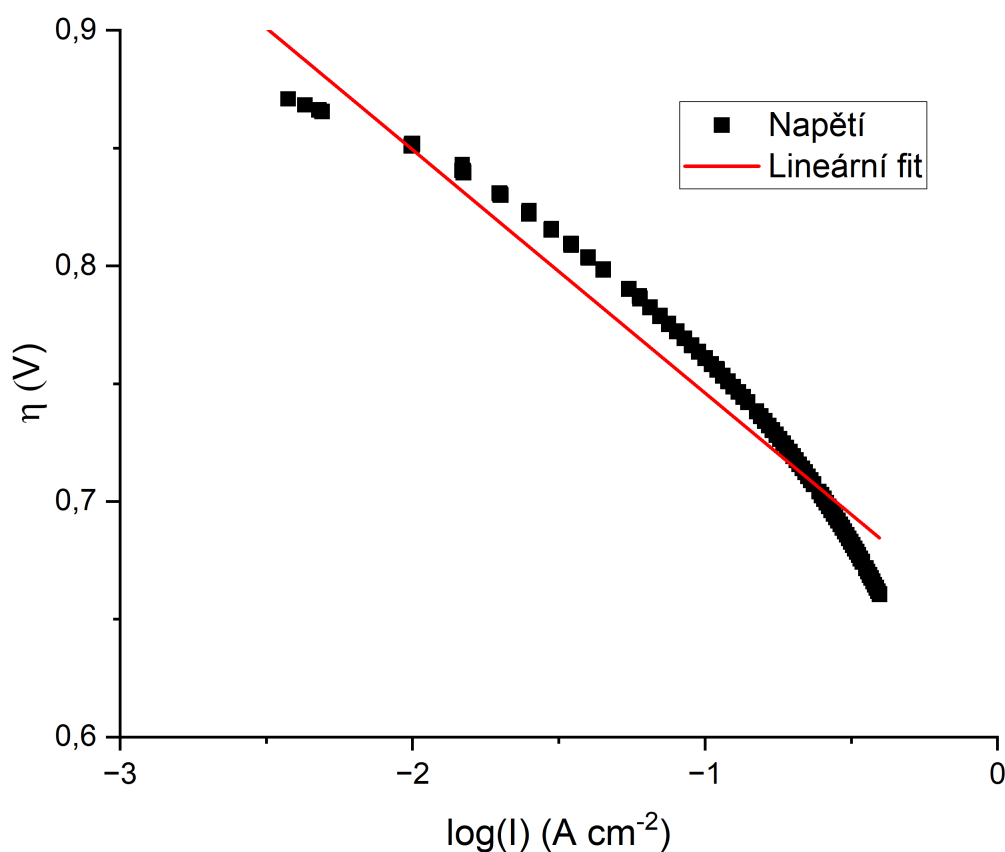
Podobně jsme fitovali lineární oblast polarizační křivky lineární funkcí $y=ax+b$ s koeficienty:

$$a = -0,2 \, \Omega \quad (7)$$

$$b = 0,7 \, V \quad (8)$$

Koeficient a odpovídá ohmickým ztrátám v lineární části grafu.

Nakonec jsme pro oblast hmotnostních ztrát určili pokles napětí, a to 0,02 V oproti očekávané lineární závislosti, která je v grafu znázorněna zeleně. To odpovídá ztrátám při přenosu hmoty.



Obr. 2: Tafelův sklon

4 Diskuse výsledků

Sestavení článku i jeho měření pomocí automatizovaného programu laboratorní stanice proběhlo bez jakýchkoliv komplikací.

Nejistotu měření edukačního článku může způsobit fakt, že naměřené hodnoty jsou průměrné po ustálení stavu článku. Jedná se tedy částečně o odhad ustáleného stavu.

Udávaná maximální zátěžová hodnota edukačního setu je minimálně 40 A, my jsme však změřili maximálně 31,7 A. To může být způsobeno neznámým stářím setu.

Ověřili jsme, že zvýšením teploty přes optimální mez se výkon článku zhoršuje. To je způsobeno vypařováním se vody z membrány, kterou je třeba stále zvlhčovat pro optimální funkčnost. S rostoucí teplotou rostou ztráty spojené s přenosem hmoty.

Oblast polarizační křivky jsme odhadli podle charakteru křivky v různých bodech. Tento odhad samozřejmě může způsobit změnu fitovaných závislostí a jejich koeficientů. Zejména v oblasti hmotnostních ztrát se tato nepřesnost může projevit. Vizualně jsou ztráty možná o něco vyšší, než jsme naměřili, avšak takto fitovaná křivka odpovídá lineární oblasti.

5 Závěr

V experimentu byl sestaven laboratorní vodíkový palivový článek a proměřeny jeho proudově-napěťové charakteristiky. Na základě získaných dat byla vykreslena polarizační křivka i Tafelův graf (aktivační oblast křivky). Zjištěné hodnoty Tafelova sklonu $a = -0,1 \text{ V cm}^2 \text{ A}^{-1}$ a konstanty $b = 0,6 \text{ V}$ odpovídají předpokládaným hodnotám pro platinový katalyzátor. V lineární oblasti jsme stanovili ohmický odpor $a = -0,2 \Omega$ a napěťovou konstantu $b = 0,7 \text{ V}$.

Ztráty způsobené omezeným přenosem hmoty se projeví poklesem napětí o přibližně $0,02 \text{ V}$ oproti ideálnímu lineárnímu průběhu. Maximální proud svazku byl $I_{\max} = 31,7 \text{ A}$ při teplotě 40°C , kdy článek dosahoval nejvyšší účinnosti. Při zvýšení teploty na 50°C došlo k poklesu výkonu v důsledku zhoršeného zvlhčení membrány.

Naměřené výsledky tedy odpovídají teoretickému očekávání: optimální výkon palivového článku je dosažen při správně zvolené teplotě a dostatečné hydrataci membrány, zatímco odchylky vedou ke zvýšení ztrát a poklesu napětí a proudu.

6 Použitá literatura

- [1] MFF. *Zadání*: [Online]. [cit. 7. října 2025].
<https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/431>
- [2] MFF. *Studijní text*: [Online]. [cit. 7. října 2025].
https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_431.pdf