

Fyzikální praktikum pro nefyzikální obory

Úloha č. 9: Fotovoltaické a palivové články, využití vodíku pro akumulaci energie

jarní semestr 2012

1. Úvod

Použití přímé přeměny slunečního záření na elektřinu pomocí fotovoltaických článků se v současnosti velmi rychle rozvíjí. Jednou z hlavních nevýhod tohoto způsobu výroby energie je nepravidelnost a nespolehlivost dodávky energie. Elektrolýza vody a zpětný zisk elektřiny sloučením vodíku a kyslíku v palivových člancích nabízí potenciální možnost akumulace elektrické energie a tím i efektivnější využití nepravidelných zdrojů elektřiny.

V této úloze se seznámíme s jednotlivými kroky přímé přeměny energie slunečního záření na elektřinu a její akumulace ve vodíku.

2. Energie slunečního záření

Téměř veškerá energie, která je na zemském povrchu k dispozici pro živou přírodu a lidskou civilizaci, pochází ze slunečního záření. Energie akumulovaná ve fosilních palivech, energie větru, vody, biomasy a samozřejmě energie přímého slunečního záření má původ v termonukleárních reakcích v nitru Slunce.

Kvantitativně je energie slunečního záření vyjádřena tzv. solární konstantou, která udává intenzitu záření (tedy výkon na jednotku plochy) na hranici zemské atmosféry. Solární konstanta je rovna 1373 W/m^2 , na plochu zemského kotouče pak dopadá celkový výkon $1,75 \cdot 10^{17} \text{ W}$. Většina UV záření a podstatná část IR záření je pohlcena v atmosféře, viz obr. 2.1, zbylá dopadá na zemský povrch a může být využita živými organismy nebo člověkem.

3. Fotovoltaický článek

Fotovoltaický nebo také solární článek je polovodičová součástka s jedním p-n přechodem, který je vytvořen v malé hloubce pod předním povrchem. Absorbí fotonu dopadajícího záření se vytvoří pár nositelů proudu elektron – díra. Elektrické napětí trvale existující na

p – n přechodu (polovodič typu n je nabit kladně a typu p záporně) od sebe elektron a díru oddělí (elektron je přitážen do n typu a díra do p typu). Takto vzniká na solárním článku tzv. fotovoltaické napětí a při zapojení článku do obvodu elektrický proud.

3.1. Měření voltampérové charakteristiky fotovoltaického článku, nalezení optimálního pracovního bodu

Každý zdroj napětí je současně zdrojem proudu. Výkon odebíraný ze zdroje určen součinem napětí a proudu, tj.

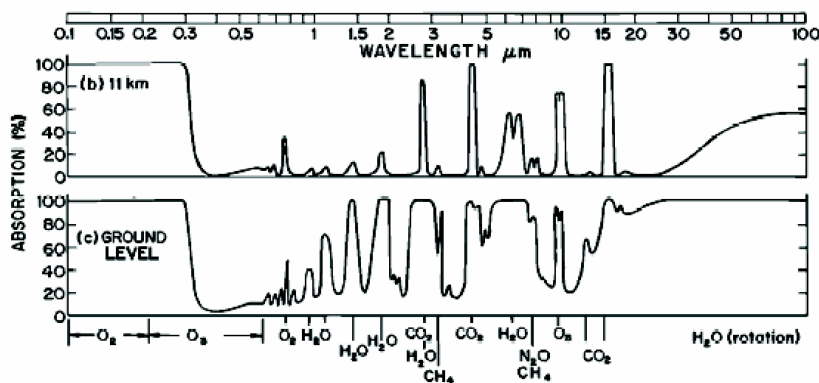
$$P = U \cdot I$$

Reálný zdroj napětí má nenulový vnitřní odpor, který způsobí pokles svorkového napětí při zvětšení odběru proudu. Pokud ze zdroje žádný proud neodebíráme (tj. připojíme zátěž nekonečně velkého odporu), je na jeho svorkách maximální napětí, které nazýváme *napětí naprázdno*. Zkratujeme-li zdroj (tj. připojíme zátěž nulového odporu), je proud ze zdroje maximální. Nazýváme jej *proud do zkratu*. V obou případech je však výkon dodávaný zdrojem nulový. Výkon, který ze zdroje odebíráme, tedy závisí na elektrickém odporu zátěže. Optimální situaci, při které získáme ze zdroje maximální výkon, říkáme *optimální pracovní bod zdroje*. Optimální pracovní bod fotovoltaického článku získáme z voltampérové charakteristiky níže popsaným postupem.

Postup měření

Solární článek zapojíme do elektrického obvodu dle obr. 3.2 (jedná se o zapojení typu A z úlohy č. 3 tohoto praktika). Proměnný odpor realizujeme reostatem.

Lampu se žárovkou umístíme do vzdálenosti asi 30 cm od článku tak, aby světlo dopadalo na článek kolmo. Jako proměnnou zátěž používáme reostat. Měříme napětí na reostatu a proud v obvodu pro různé hodnoty odporu reostatu. Pro měření napětí a proudu používáme napěťové a proudové sondy napojené na datalogger Vernier (viz dodatek); data se přenášejí na počítač. Zpracování dat v podobě tabulek a grafů provádíme v programu Qtiplot (viz dodatek). Pro každou dvojici napětí a proudu spočítáme výkon, který vynešeme do grafu jako funkci napětí. Určíme napětí v pracovním bodě jako hodnotu v maximu výkonu. S pomocí voltampérové charakteristiky (závislosti proudu na napětí) určíme proud v obvodu a odpor zátěže, které odpovídají pracovnímu bodu.



Obrázek 2.1: Absorpce slunečního záření v atmosféře

Odhad energetické účinnosti solárního článku při osvětlení žárovkou

Přibližný odhad účinnosti solárního článku lze udělat následujícím způsobem. Předpokládejme, že žárovka jako bodový zdroj záření svítí izotropně do celého prostoru. Žářivý výkon, který dopadne na solární článek o ploše S a vzdálenosti r od žárovky pak můžeme spočítat jako

$$P = P_0 \frac{S}{4\pi r^2}$$

kde P_0 je celkový žářivý výkon žárovky. Pokud pro jednoduchost předpokládáme, že žárovka celý elektrický příkon vyzáří (tj. tepelné ztráty vedením vzduchem a patičí žárovky jsou zanedbatelné), můžeme za P_0 dosadit nominální příkon žárovky. Plochu solárního článku a jeho vzdálenost od žárovky změříme svinovacím metrem. Při měření výkonu článku v pracovním bodě musíme použít žárovku bez stínítka, které může měřené hodnoty významně zkreslit.

Účinnost solárního článku pak spočítáme jako

$$\eta_S = \frac{P_S}{P}$$

kde P_S je výkon solárního článku při daném osvětlení, měřený v pracovním bodě.

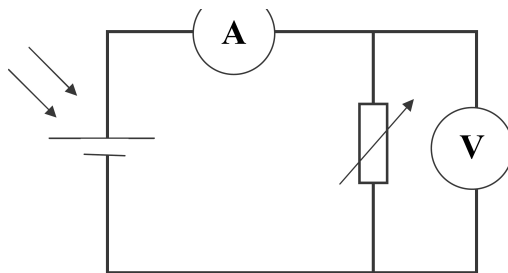
3.2. Spektrální účinnost fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek přemění část energie dopadajícího záření jen tehdy, pokud se foton absorbuje za vzniku páru elektron – díra. Šířka zakázaného pásu křemíku je 1,1 eV, což odpovídá energii dopadajícího fotonu s vlnovou délkou 1,1 μm ¹. Tedy pouze ta část záření Slunce, jejíž vlnová délka je menší než 1,1 μm může být převedena na elektřinu². Na obr. 3.3 je emisní spektrum Slunce. Vidíme, že většina energie slunečního záření (asi 75%) je v oblasti vlnových délek kratších, než je absorpční mez křemíku. Pokud navíc srovnáme oblast absorpce v křemíku s rozsahem vlnových délek intenzivního slunečního záření dopadajícího na zemský povrch, je zřejmé, že obě oblasti sobě dobře odpovídají. Přesto křemík není na převod slunečního záření na elektřinu optimální a fotovoltaické články z jiných materiálů dosahují i výrazně vyšší účinnosti než křemíkové³.

¹Shoda čísel je pouze náhodná. Vyšší energie fotonu odpovídá jeho menší vlnové délce.

²Absorpční spektrum křemíku viz návod k úloze č. 8.

³Pro masové použití je hlavní výhodou křemíkových solárních článků jejich relativně nízká cena a menší ekologická rizika spojená s výrobou a likvidací článků.

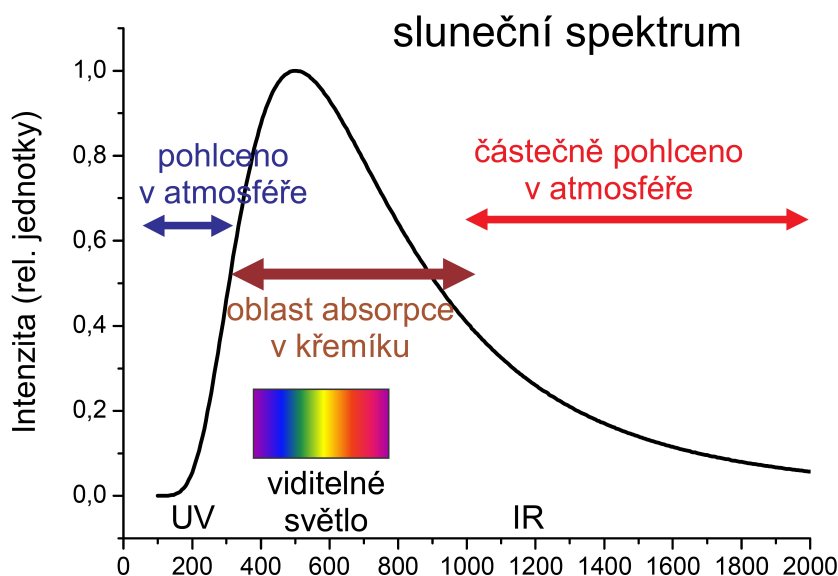


Obrázek 3.2: Zapojení solárního článku pro měření VA charakteristiky

Každý foton elektromagnetického záření nese energii nepřímo úměrnou vlnové délce dle známého vztahu

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

kde h je Planckova konstanta a c rychlost světla. Teoreticky stačí k vytvoření páru elektron – díra foton s vlnovou délkou asi 1100 nm⁴. Pokud vznik páru způsobí například foton s vlnovou délkou 550 nm, který má dvojnásobnou energii, polovina jeho energie je zmařena a není převedena na energii elektrickou. Lze tedy očekávat, že účinnost křemíkového solárního článku bude klesat s klesající vlnovou délkou.



Obrázek 3.3: Emisní spektrum Slunce s vyznačením významných oblastí

V praktiku použijeme pro kvalitativní ověření spektrální účinnosti solárního článku jako zdroje světla žárovku. Na rozdíl od slunečního záření je maximum vyzařování žárovky v IR oblasti, viz obr. 3.4, což je při interpretaci výsledků nutné vzít do úvahy.⁵

Postup měření

Výstup solárního článku připojíme na ampérmetr, budeme tedy měřit proud do zkratu. Solární článek osvítíme halogenovou žárovkou.

Do cesty světlenému svazku postupně klademe červený, zelený a modrý filtr, které vymezi vždy přibližně třetinu viditelné části spektra žárovky.

⁴Poznámka pro pokročilé: Křemík je polovodič s nepřímým přechodem a proto jeho schopnost absorbovat záření na této vlnové délce je ještě velmi malá.

⁵Problematika spektra záření wolframového vlákna žárovky je složitější. Wolfram obecně nezáří jako černé (nebo šedé) těleso, ale jeho emisivita bývá závislá na vlnové délce, což deformuje vyzařované spektrum. Často se uvádí, že emisivita roste s klesající vlnovou délkou, což znamená, že vlákno září podobně jako by mělo vyšší teplotu než je jeho teplota skutečná. Avšak není tomu tak vždy, navíc spektrální charakteristika emisivity se mění během doby provozu žárovky. Více informací lze najít například zde: http://www.pyrometry.com/farassociates_tungstenfilaments.pdf.

Srovnáním propustnosti filtrů a vyzařovacího spektra halogenové žárovky lze určit přibližný procentuální podíl vyzařované energie žárovky prošlé přes příslušný barevný filtr, viz tabulka ⁶.

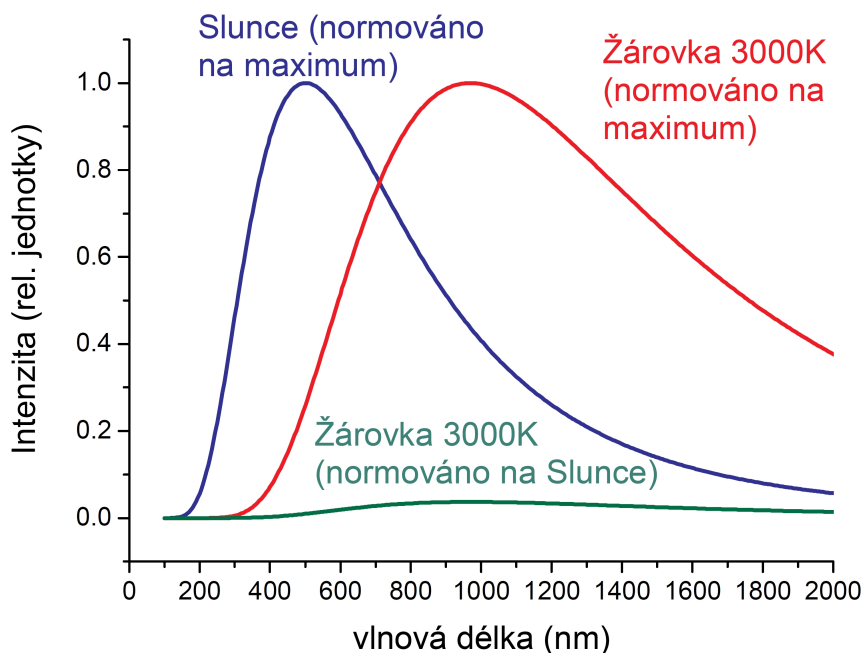
filtr	podíl energie záření (%)
červený	3,7
zelený	1,7
modrý	1,0

Porovnáme naměřené proudy pro jednotlivé barevné filtry s údaji ve výše uvedené tabulce. Vidíme výrazný nesouhlas. Modrý filtr vykazuje mnohem větší měřený proud, než by odpovídalo jeho podílu v záření žárovky. Důvod je prostý. Barevné filtry jsou současně propustné i v infračervené oblasti, ve které křemíkový solární článek již pracuje ⁷. Abychom tento parazitní vliv odstranili, přiložíme k barevným filtrům navíc i tzv. IR-cut filtr, který většinu IR záření pohltí.

Nyní opakujte měření zkratového proudu s trojicí filtrů doplněnými IR-cut filtrem. Porovnejte měřené hodnoty s energetickým podílem dané oblasti záření žárovky. Výsledky komentujte.

⁶Tabulka je počítána za předpokladu, že uvedené barevné filtry zcela nepropouští v neviditelné UV a IR oblasti. Ve skutečnosti to pravda není a všechny filtry propouští i IR záření. Experimentálně tento vliv snížíme použitím tzv. IR-cut filtru, viz dále. UV oblast problémy nepřináší, protože UV záření je žárovkou emitováno jen velmi málo.

⁷Můžete si to vyzkoušet s IR diodou a videokamerou, které jsou k dispozici v úloze č. 8. Snadno zjistíte, že záření IR diody přes všechny filtry prochází.



Obrázek 3.4: Srovnání slunečního spektra a spektra halogenové žárovky

3.3. Měření na fotovoltaickém článku, na který dopadá sluneční záření

Na jižní straně budovy je z venkovní strany při okně umístěn fotovoltaický článek. Článek je připojen měřicí systém Tecomat Foxtot.

- Foxtrot umožňuje pomocí dvou relé nastavit různá zapojení článku -
 1. na odporovou zátěž, která je přibližně optimální pro dosažení maximálního výkonu
 2. nakrátko
 3. naprázdnoPřitom dlouhodobě má být nastaveno zapojení na odporovou zátěž.
- Foxtrot měří napětí a proud, který článek poskytuje, teplotu článku a teplotu v místnosti.
- Foxtrot ukládá získaná data na paměťovou kartu, je připojen na internet. Data o měření najdete na adrese <http://foxtrot.physics.muni.cz>, přihlašovací jméno `student`, heslo `studentf`.

Krátkodobá měření na fotovoltaickém článku

Přímo na krabičce Foxtrotu si zobrazíme stránku s údajem o napětí a proudu z článku. Můžeme sledovat, jak se údaje mění v čase - podle toho, jak se mění přirozený sluneční osvit článku. Můžeme také otevřít okno, část panelu zakrýt a zjistit, jak to ovlivní napětí a proud.

Článek je dlouhodobě připojen na odporovou zátěž. Na Foxtrotu nastavíme zapojení článku naprázdno a zjistíme napětí naprázdno. Na Foxtrotu nastavíme zapojení článku nakrátko a zjistíme proud nakrátko. Porovnáme naměřené napětí naprázdno a proud nakrátko s nominálními hodnotami udanými výrobcem - Open circuit voltage 21,96 V, Short circuit current 0,32 A. Porovnáme naměřené napětí naprázdno a proud nakrátko s údaji pro odporovou zátěž.⁸

Vliv zastínění na činnost fotovoltaického panelu

Vezměte neprůhlednou obdélníkovou destičku a přiložte ji na panel. Jednou tak, že je zakryta třetina aktivní plochy panelu ze strany delšího rozměru panelu a potom ze strany kratšího rozměru. Pak zakryjte celou plochu panelu. Sledujte vliv zastínění na napětí naprázdno a na proud nakrátko.

Po měření vraťte nastavení na odporovou zátěž.

Dlouhodobé měření energie slunečního záření získané z fotovoltaického článku

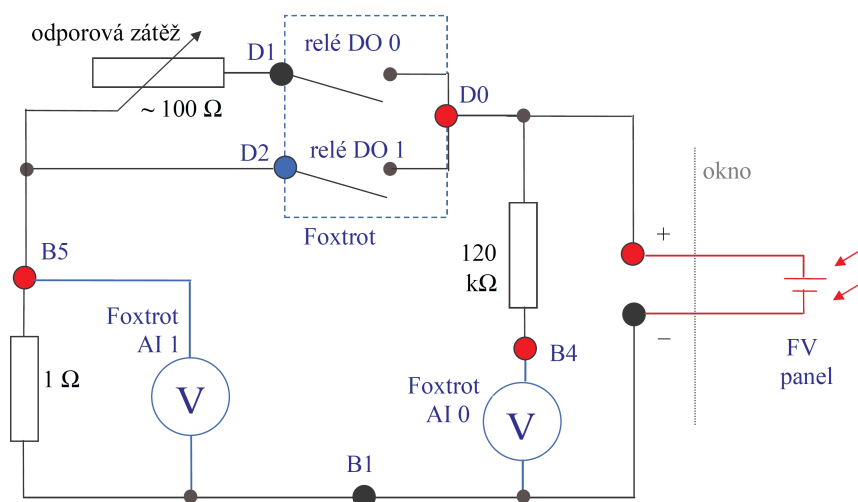
Stáhněte si z internetu data o napětí a proudu z článku. Data si zkopírujte do vhodného programu. Určete maximální a průměrný výkon fotovoltaického článku za předchozí kalendářní den případně za delší období.⁹

Postup měření

Ve vhodném programu, například Excel, proveďte integraci a vypočtete celkovou energii

⁸Může se stát, že článek byl předtím osvětlen sluncem a pak slunce zakryl mrak; pak údaje získané za různých podmínek nejsou srovnatelné.

⁹Optimální pracovní bod (a s ním spjatá optimální zátěž) závisí na tom, jak je fotovoltaický panel osvětlen. Zátěž panelu je při dlouhodobém měření neměnná a tedy v závislosti na osvětlení je někdy více a někdy méně odchylná od optimální zátěže. Z toho je zřejmé, že elektrická energie dodaná panelem v případě konstantní zátěže je menší než maximální energie dosažitelná v případě, že zátěž je nastavována v každém okamžiku na optimální hodnotu.



Obrázek 3.5: Schéma - fotovoltaický panel

získanou za sledované období, například následujícím postupem: Označíme-li jednotlivá měřená napětí U_i a proudy I_i , je celková energie ¹⁰ rovna :

$$E_C = \sum U_i \cdot I_i \cdot \Delta t$$

kde Δt je nastavený interval mezi dvěma měřeními (tzv. vzorkovací perioda). Sčítáme přes všechny naměřené hodnoty. Průměrný výkon dodávaný fotovoltaickým článkem pak můžeme určit jako

$$\bar{P} = \frac{E_C}{\Delta t \cdot (n - 1)}$$

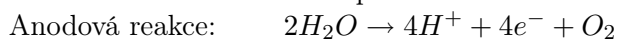
kde n je celkový počet měření.

4. Elektrolyzér

V elektrolyzérovi dochází k rozkladu molekul vody na vodík a kyslík. V praktiku je k dispozici tzv. PEM elektrolyzér, který k oddělení vodíku a kyslíku používá polymerové membrány (Polymer Electrolyte Membrane). PEM elektrolyzér se skládá ze tří vrstev (viz obr. 4.6). Prostřední vrstva je membrána podobné struktury jako třeba teflon a je propustná pro protony. Tato vrstva je obklopena z obou stran kovovými elektrodami.

Připojíme-li na PEM článek ponořený ve vodě elektrické napětí, začne obvodem protékat proud. Na anodě se štěpí molekuly vody, vodíkové ionty (protony) odchází přes membránu ke katodě a elektrony putují směrem k zdroji napětí. Protony u katody doplní elektron na atomy vodíku a ty se sloučí na plyný vodík. Na anodě zůstaly atomy kyslíku, které se zde slučují na plyný kyslík.

Reakční schéma tohoto procesu:



¹⁰Takto určená celková energie je jen dolní odhad energie, kterou lze maximálně z fotovoltaického článku získat. Ve skutečnosti je pracovní bod článku závislý na osvitě a pro při změně intenzity slunečního svitu by bylo nutné pracovní bod operativně měnit.

Katodová reakce: $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$

Celková reakce: $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$

Zásady práce s elektrolyzérem

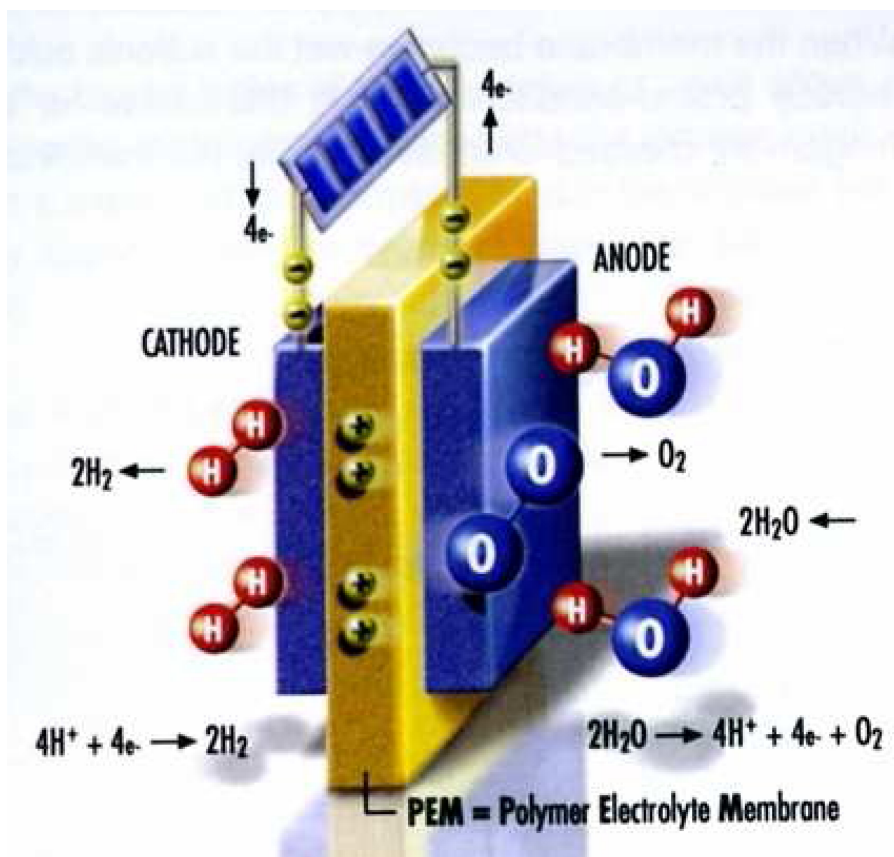
Elektrolyzér propojíme hadičkami se zásobníky na kyslík a vodík. Oba zásobníky zaplníme až po značku destilovanou vodou. Voda by měla elektrolyzér zaplavit. Pokud se tak nestane, pak do něj napumpujeme vodu pravidelným mačkáním spodní hadičky. Výstupní (dlouhé) hadičky vedoucí ze zásobníků sevřeme tlačkami. K elektrolyzéru připojíme zdroj napětí, kladný pól na červenou svorku.

POZOR! Napětí na zdroji nesmí přesáhnout 2V pro jednoduchý elektrolyzér resp. 4V pro elektrolyzér dvojitý.

Po připojení zdroje při určité hodnotě napětí začne horními hadičkami z elektrolyzéra unikat vodík (z katody) a kyslík (z anody). Oba plyny jsou jímány v zásobnících, odkud vytlačují vodu do horního prostoru.

4.1. Měření voltampérové charakteristiky elektrolyzéra.

Do obvodu se zdrojem a elektrolyzérem připojíme ampérmetr a voltmetr tak, abychom mohli měřit napětí na elektrolyzéru a proud, který obvodem protéká. (Zapojení zakreslete



Obrázek 4.6: Schéma PEM elektrolyzéra

do pracovního sešitu.) Měříme závislost proudu na napětí v rozsahu 1V–2V. Při zvyšování napětí nejprve elektrolyzérem proud neprotéká. Teprve až po dosažení hodnoty tzv. rozkladného napětí, začne elektrolytický rozklad molekul vody a elektrolyzérem protéká proud. Současně pozorujeme unikání plynů do zásobníků. Nad rozkladným napětím roste proud v závislosti na napětí přibližně lineárně. Hodnotu rozkladného napětí určíme jako průnik prodloužené lineární závislosti s osou napětí.

4.2. Měření účinnosti elektrolyzéro

Účinností elektrolyzéro myslíme poměr energie obsažené ve vyrobeném vodíku ku elektrické energii spotřebované při jeho výrobě, tj.

$$\eta_e = \frac{E_{\text{H}_2}}{E_{\text{el}}} = \frac{V_{\text{H}_2} \cdot H}{U \cdot I \cdot t}$$

kde V_{H_2} je objem vodíku vyloučený za čas t při napětí U a proudu I . Konstanta H určuje, kolik energie získáme jeho spálením, nazývá se spalné teplo a pro vodík je rovna $10,8 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}$.

Na elektrolyzéro přivedeme napětí 2 V a po jistou vhodnou dobu necháme probíhat elektrolyzu. Současně měříme napětí, proud a množství vzniklého plynu. Z naměřených hodnot spočítáme účinnost elektrolyzy.

Všimněte si, že objem vodíku je dvojnásobný než objem kyslíku. Víte proč?

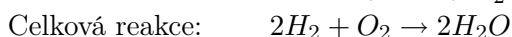
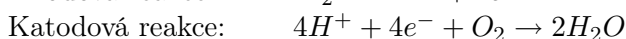
5. Palivový článok

V palivovém článku dochází ke zpětnému sloučení vodíku s kyslíkem za vzniku vody. Současně ve vnějším obvodu vzniká elektrický proud. Palivový článok tedy umožňuje přímou přeměnu vazebné energie vody na elektřinu a je tak alternativou ke spalování vodíku v plameni.

Konstrukce PEM palivového článku je podobná jako u PEM elektrolyzéro. Skládá se ze dvou platinových elektrod, které jsou odděleny speciální polymerovou membránou propustnou pro vodíkové ionty (protony). Při činnosti palivového článku přivádíme k anodě plyný vodík. Platinová anoda zde funguje jako katalyzátor pro rozklad molekulárního vodíku na protony a elektrony.

Elektrony a protony se pak pohybují směrem ke katodě, ale elektrony jdou vnějším obvodem, zatímco protony se pohybují přes membránu. Na katodu přivádíme plyný kyslík, který se zde sloučí s protony a elektrony na vodu.

Reakční schéma tohoto procesu:



5.1. Měření účinnosti palivového článku

Účinnost palivového článku je definována jako poměr elektrické energie vyrobené článkem ku energii obsažené ve spalném teple vodíku, tj.

$$\eta_p = \frac{E_{\text{el}}}{E_{\text{H}_2}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{V_{\text{H}_2} \cdot H}$$

Ukazuje se, že výkon palivového článku kolísá. při vlastním měření tedy postupujeme tak, že v pravidelných intervalech Δt zapisujeme okamžité napětí a proud U_i a I_i . Pro každý časový interval spočítáme energii vyrobenou článkem jako

$$E_i = U_i \cdot I_i \cdot \Delta t$$

a celkovou vyrobenou elektrickou energii získáme jako součet dílčích energií přes všechny naměřené intervaly. Účinnost palivového článku tedy bude rovna

$$\eta_p = \frac{E_{\text{el}}}{E_{\text{H}_2}} = \frac{\sum_i U_i \cdot I_i \cdot t}{V_{\text{H}_2} \cdot H}$$

6. Celková účinnost solárně vodíkového procesu výroby a akumulace energie

Proces výroby a akumulace solární energie obsahuje tři výše studované kroky, z nichž každý je charakterizován energetickou účinností. Celková účinnost celého procesu je dána jako součin těchto dílčích účinností, tedy

$$\eta_{\text{celk}} = \eta_s \cdot \eta_e \cdot \eta_p$$

Hodnotu, kterou vypočítáme ze zde naměřených dat lze brát pouze jako orientační. Účinnosti jednotlivých procesů závisí na různých parametrech, například teplotě, konkrétní konstrukci zařízení a podobně. Zdrojem největší chyby je odlišné spektrum žárovky od spektra slunečního při orientačním měření účinnosti solárního článku s žárovkou jako zdrojem světla. Přesnější hodnotu získáte s použitím účinnosti solárního článku měřené v kombinaci s kalorimetrickou metodou měření intenzity slunečního záření. (Pokud jste tuto metodu nepoužili, vyžádejte si výsledek měření od Vašich kolegů). Přesto je takto získaná hodnota řádově správná a lze ji použít pro posouzení reálných možností masové aplikace tohoto procesu v energetice.

Tématické bloky úkolů

Pro měření v praktiku vyučující zadá jeden z následujících experimentálních bloků:

Studium vlastností solárního článku

1. Změřte voltampérovou charakteristiku solárního článku a určete jeho optimální pracovní bod (návod odst. 3.1.).
2. Spočtete orientační hodnotu účinnosti v pracovním bodě (návod odst. 3.1.).
3. Sledujte vliv spektra dopadajícího záření na výstup ze solárního článku (návod odst. 3.2.).

Studium vlastností elektrolyzéry a palivového článku

1. Změřte voltampérovou charakteristiku elektrolyzéry a určete jeho účinnost (návod odst. 4.1. a 4.2.).
2. Změřte účinnost palivového článku (návod odst. 5.1.).

Měření na fotovoltaickém článku, na který dopadá sluneční záření

1. Změřte napětí naprázdno, proud nakrátko a napětí a proud při odporové zátěži (návod odst. 3.3.).
2. Sledujte vliv zastínění na činnost fotovoltaického článku.
3. Určete maximální a průměrný výkon fotovoltaického článku za předchozí kalendářní den. (návod odst. 3.3.).

Orientační měření účinnosti celého procesu získávání energie ze Slunce a její akumulace ve vodíku

1. Změřte orientační účinnost solárního článku v optimálním pracovním bodě (návod odst. 3.1.). Hodnotu zátěže v optimálním pracovním bodě Vám sdělí vyučující, případně naleznete optimální pracovní bod pomocí měřicího systému Vernier (viz návod k obsluze dataloggeru).
2. Změřte účinnost elektrolyzéry (návod odst. 4.2.).
3. Změřte účinnost palivového článku (návod odst. 5.1.).
4. Z uvedených účinností vypočtete celkovou účinnost procesu získávání energie ze Slunce a její akumulace ve vodíku (návod kap. 6.).
5. Spočítejte následující příklad: Vyrábíme elektřinu pomocí solárních článků a akumulujeme ji ve vodíku. Jakou plochu by musely mít solární články, aby energie akumulovaná z roční výroby solárních článků byla rovna roční produkci JE Temelín? Temelínská elektrárna má elektrický výkon 2 GW a pracuje asi 85% doby v roce. Na 1m^2 povrchu země v ČR dopadá za rok asi 1000 kWh energie slunečního záření.

A Měření proudu a napětí s využitím sond a dataloggeru Vernier

Používáme proudovou sondu (Current) a napěťovou sondu (Differential Voltage). Taková sonda má vždy dva měřicí vodiče k zapojení do obvodu a jeden datový kabel, který se zapojí do dataloggeru Vernier. Vernier je datovým kabelem s USB konektorem zapojen do počítače. Vlastní měření řídíme počítačem pomocí programu Logger Lite. Zpracování dat - nalezení optimálního pracovního bodu fotovoltaického článku - pak provádíme v programu Qtiplot.

Příprava na měření. Zapneme počítač a spustíme v něm program Logger Lite, který zpracovává data z dataloggeru Vernier. Zapneme datalogger Vernier. Vynulujeme napěťovou sondu - měřicí vodiče z napěťové sondy zkratujeme (přiložíme k sobě) a v programu Logger Lite stiskneme tlačítko Nulovat. SONDY zapojíme do obvodu jako voltmetr a jako ampérmetr. Zapneme žárovku - svítí na fotovoltaický článek.

Etapa počátečního průzkumu. Program Logger Lite ukazuje okamžité hodnoty napětí a proudu na sondách. Měníme hodnotu odporu reostatu a sledujeme, jak se mění proud a napětí.

Etapa sběr dat. Na reostatu nastavíme vysokou hodnotu odporu. V programu Logger Lite v položce Experiment - Sběr dat nastavíme vhodnou vzorkovací frekvenci a trvání měření. Potom zadáme Experiment - Spustit sběr dat. Během doby měření postupně plynule snižujeme odpor reostatu.

B Program Qtiplot pro zpracování měření - tabulky a grafy

Zpracování dat z měření provádíme v programu Qtiplot. Data z programu Logger Lite zkopírujeme do programu Qtiplot do sloupců 1 až 3. Tabulku rozšíříme o další dva sloupce. Ve sloupci 4 zadáme výpočet odporu - podíl napětí a proudu, ve sloupci 5 zadáme výpočet výkonu - součin napětí a proudu.

Zadání výpočetního vzorce pro sloupec : v záhlaví sloupce stiskneme pravé tlačítko myši a volíme položku Set column values. V roletkovém menu zvolíme sloupec vstupující do výpočtu a zadáme Add column. Symbol příslušného sloupce col(n) se objeví z dolním okénku. Nyní zadáme matematickou operaci, která má se sloupci nastat - přímým stiskem klávesy. V roletkovém menu zvolíme druhý sloupec vstupující do výpočtu a zadáme Add column. Po stisku tlačítka Apply se provede výpočet.

Tvorba grafu. Stanovení nezávisle proměnné X a závisle proměnné Y pro graf. Sloupec s napětím označíme jako X (výběr sloupce a stisk ikony X), sloupec s výkonem označíme jako Y (výběr sloupce a stisk ikony Y). Tyto dva sloupce společně označíme - stisk záhlaví prvního a pak s přídržní tlačítka CTRL stisk záhlaví druhého sloupce. Nyní stiskneme ikonu pro vytvoření grafu typu čára + symbol.

Z grafu určíme, pro jaké napětí je výkon maximální - optimální pracovní bod fotovoltaického článku.