

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

jarní semestr 2023

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 článcích 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 Země 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. 1, zbytek dopadá na zemský povrch a může být využit živými organismy nebo člověkem.

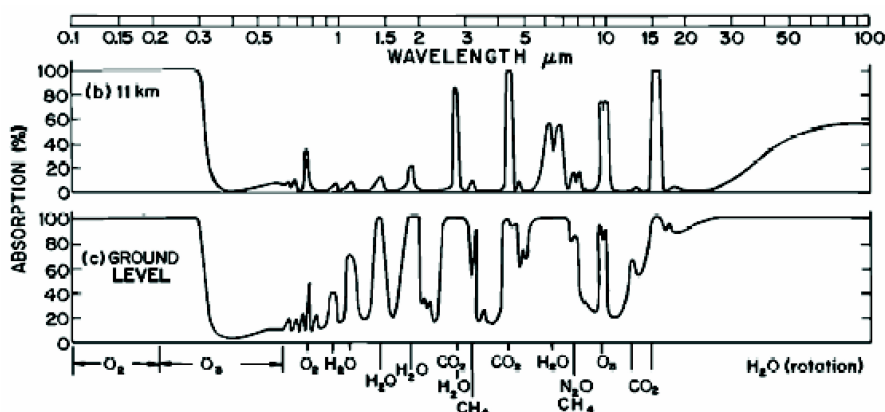
3 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický nebo také solární článek je polovodičová součástka s jedním p-n přechodem, který je vytvořen v malé hloubce pod předním povrchem. Absorpcí 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.

$$P = U \cdot I$$



Obrázek 1: Absorpce slunečního záření v atmosféře. Grafy udávají závislost části záření pohlcené v atmosféře v % na vlnové délce záření. Horní graf vyjadřuje situaci ve výšce 11 km, dolní graf situaci v úrovni hladiny moře. Popisky dole pod grafy - složky vzduchu, které způsobují absorpci v daném úseku vlnových délek.

Reálný zdroj napětí má nenulový vnitřní odpor, který způsobí pokles svorkového napětí při zvětšení odběru proudu. Pokud ze zdroje žádný proud neodebíráme (tj. jako zátěž připojíme nekonečně velký odpor), je na jeho svorkách maximální napětí, které nazýváme *napětí naprázdno*. Zkratujeme-li zdroj (tj. jako zátěž připojíme nulový odpor), 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 popsáním postupem.

Postup měření

Solární článek zapojte do elektrického obvodu dle obr. 2 (jedná se o zapojení typu A z úlohy č. 3 tohoto praktika). Proměnný odpor realizujte reostatem.

Přípravek s 24 V žárovkou zapojte do zdroje Manson SPS9602, nastavte na něm napětí *maximálně 24 V* (nominální napětí žárovky). Přípravek se žárovkou umístěte do vzdálenosti asi 30 cm od fotovoltaického článku tak, aby světlo dopadalo na článek kolmo. Měřte napětí na reostatu a proud v obvodu pro různé hodnoty odporu reostatu. Pro měření napětí a proudu používejte napěťové a proudové sondy firmy Pasco (viz dodatek A); data se přenášejí na počítač. Zpracování dat v podobě tabulek a grafů proveďte v programu Pasco Capstone.

Pro každou dvojici napětí a proudu vypočtete v kalkulátoru Pasco Capstone výkon P a odpor R , vytvořte graf závislosti výkonu na odporu; v tomto grafu určete optimální pracovní bod jako hodnotu odporu, pro který je výkon maximální. Vytvořte graf závislosti proudu na napětí (voltampérovou charakteristiku).

Tento postup opakujte pro několik nižších hodnot napětí na žárovce, kterou osvětluje fotovoltaický článek. První měření bylo provedeno s napětím na žárovce 24 V, měření opakujte pro napětí nižší vždy o 2 V, tedy pro napětí 22 V, 20 V, 18 V, 16 V a všimněte si změn v poloze optimálního pracovního bodu. Jaké jsou změny na voltampérové charakteristice?

Odhad energetické účinnosti solárního článku při osvětlení žárovkou

Přibližný odhad účinnosti solárního článku lze udělat následujícím způsobem. Předpokládáme, že žárovka jako bodový zdroj záření svítí izotropně do celého prostoru. Povrch stínítka žárovky je černý; proto předpokládáme, že odraz záření na stínítku je tak malý, že neovlivní významně

izotropní šíření záření z žárovky. Zářivý výkon, který dopadne na solární článek o ploše S ve vzdálenosti r od žárovky, pak můžeme spočítat jako

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

kde P_0 je celkový zářivý výkon žárovky. Pokud pro jednoduchost předpokládáme, že žárovka celý elektrický příkon vyzáří (tj. tepelné ztráty vedením vzduchem a patičí žárovky jsou zanedbatelné), potom $P_0 = U \cdot I$, kde U a I je napětí na žárovce a proudu žárovkou.

Postup měření

Hodnoty proudu a napětí určete z údajů na displeji zdroje Manson. Rozměry solárního článku a jeho vzdálenost od žárovky změřte svinovacím metrem.

Účinnost solárního článku pak spočítejte jako

$$\eta_s = \frac{P}{P_z},$$

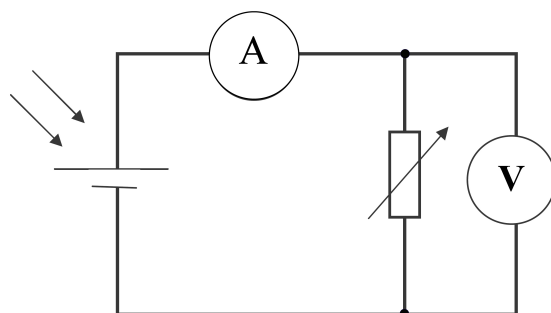
kde P je elektrický výkon solárního článku při daném osvětlení, ideálně měřený v optimálním pracovním bodě. Ze získaných údajů spočítejte orientační hodnotu účinnosti v pracovním bodě.

3.2 Spektrální účinnost fotovoltaiického článku

Fotovoltaiický 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 $1,1 \mu\text{m}$ ¹. Tedy pouze ta část záření Slunce, jejíž vlnová délka je menší než $1,1 \mu\text{m}$, může být převedena na elektřinu². Na obr. 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 fotovoltaiické články z jiných materiálů dosahují i výrazně vyšší účinnosti než křemíkové³.

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

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



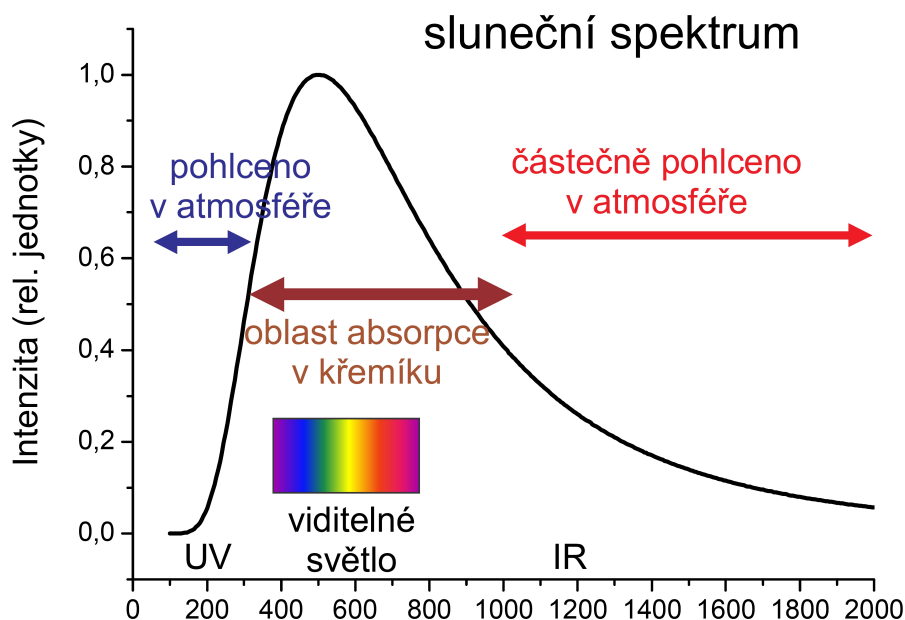
Obrázek 2: Zapojení solárního článku pro měření VA charakteristiky

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

²Absorpční spektrum křemíku viz návod k úloze č. 7, Absorpce a emise světla.

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

kde h je Planckova konstanta a c rychlost světla. Teoreticky stačí k vytvoření páru elektron – díra foton s vlnovou délkou asi 1 100 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: Emisní spektrum Slunce s vyznačením významných oblastí. Na vodorovné stupnici je vlnová délka v nm.

V praxi 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. 4, což je při interpretaci výsledků nutné vzít do úvahy.⁵

Postup měření

K měření použijte malý solární článek uložený v dřevěném rámečku. Plocha tohoto článku je tak malá, že ji lze zcela zakrýt filtrem; to je nutné, aby výsledky nebyly zkresleny zářením, které by prošlo filtrem.

Solární článek osvětlete halogenovou žárovkou. Výstup solárního článku připojte na ampérmetr, budete tedy měřit proud do zkratu. - Změřte proud nakrátko bez filtrů.

Do cesty světelnému svazku postupně kladte červený, zelený a modrý filtr, které vymezí vždy přibližně třetinu viditelné části spektra žárovky. - Změřte proud nakrátko pro jednotlivé filtry.

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

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.

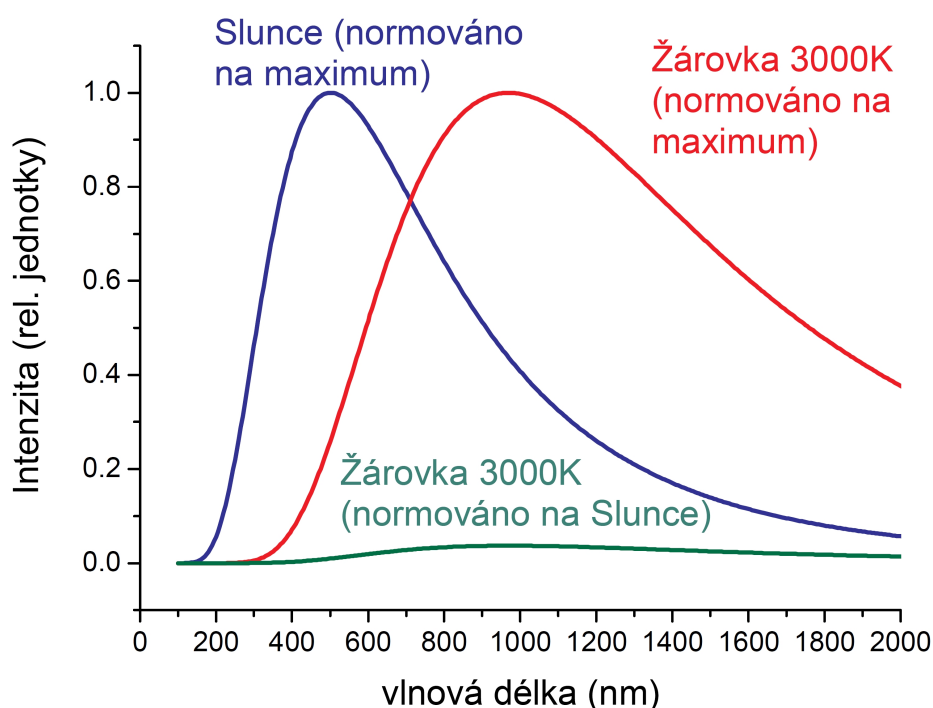
Barevné filtry jsou současně propustné i v infračervené oblasti, ve které křemíkový solární článek již pracuje ⁶. Abyste tento parazitní vliv odstranili, přiložte k barevným filtrům navíc i tzv. IR-cut filtr, který většinu IR záření pohltí.

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

3.3 Měření na fotovoltaickém článku, na který dopadá sluneční záření

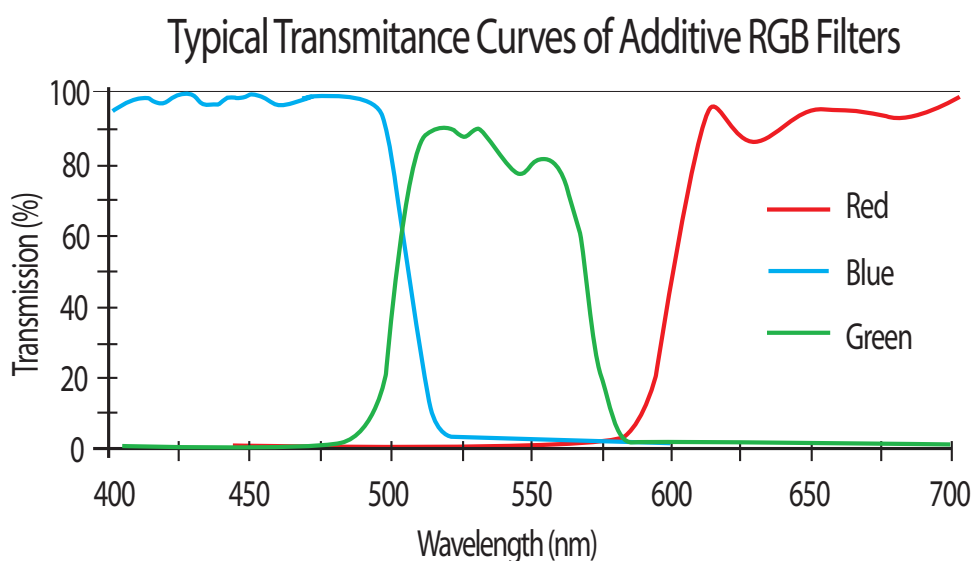
Na jižní straně budovy je z venkovní strany při okně umístěn fotovoltaický článek. Článek je připojen na programovatelný automat (PLC) Tecomat Foxtrot, který dovoluje jeho dlouhodobé měření.

- 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>.

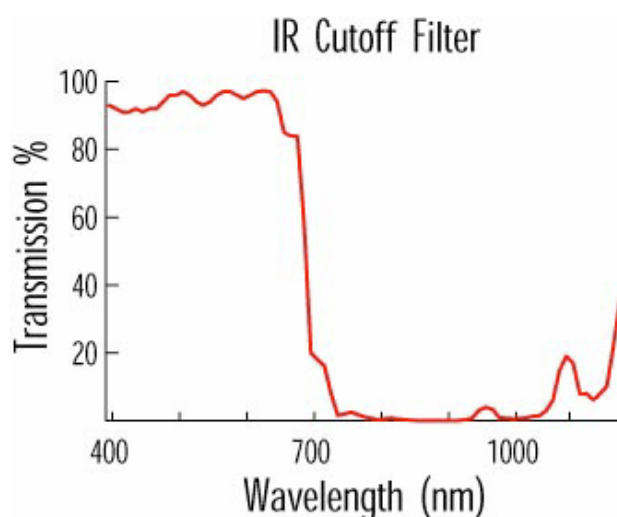


Obrázek 4: Srovnání slunečního spektra a spektra halogenové žárovky

⁶Můžete si to vyzkoušet se svítilnou s IR diodami a spektroskopem Avaspec, které jsou k dispozici v úloze č. 7. Snadno zjistíte, že záření IR diod přes všechny filtry prochází.



Obrázek 5: RGB filtry



Obrázek 6: IR-cut filtr

Krátkodobá měření na fotovoltaiickém 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.⁷

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

⁷Toto měření je silně ovlivněno počasím a denní dobou. Proto nebude možné provádět ho v každém praktiku a výsledky naměřené za odlišných podmínek se mohou výrazně lišit.

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

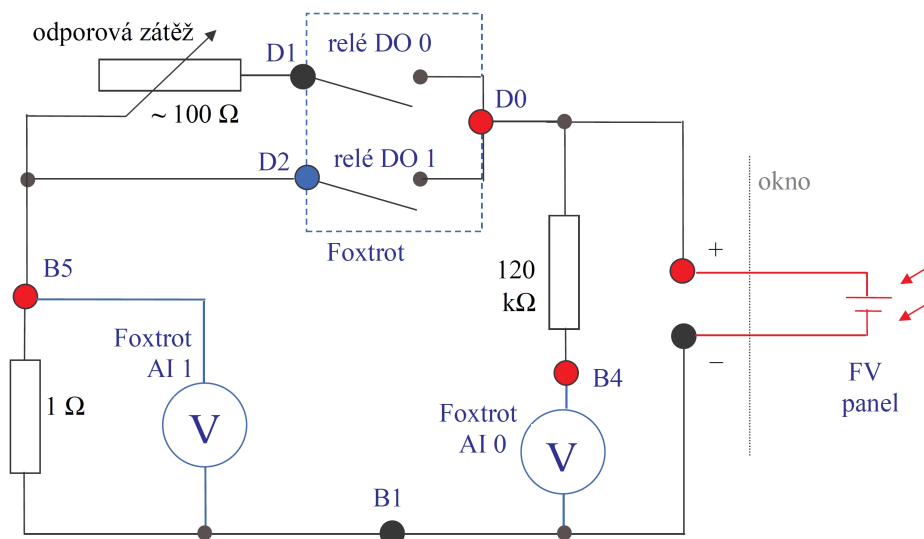
Vliv zastínění na činnost fotovoltaického panelu

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.

Pokud je fotovoltaický článek silně zaprášen, očistěte jej a sledujte, jaký to má vliv.

Po měření nastavte na Foxtrotu opět odporovou zátěž.⁹



Obrázek 7: Schéma – fotovoltaický panel

Postup měření

Změřte napětí naprázdno, proud nakrátko a napětí a proud při odporové zátěži. Sledujte vliv zastínění na činnost fotovoltaického článku.

Dlouhodobé měření energie slunečního záření získané z fotovoltaického článku

Ve vhodném programu, například QtiPlot, provedeme integraci a vypočteme celkovou energii získanou za sledované období, například následujícím postupem: Označíme-li jednotlivá měřená napětí U_i a proudy I_i , je celková energie¹⁰ rovna:

$$E_C = \sum_i U_i I_i \Delta t$$

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

$$\bar{P} = \frac{E_C}{T},$$

kde T je celková doba měření.

⁹Pro dlouhodobé měření má být nastavena odporová zátěž.

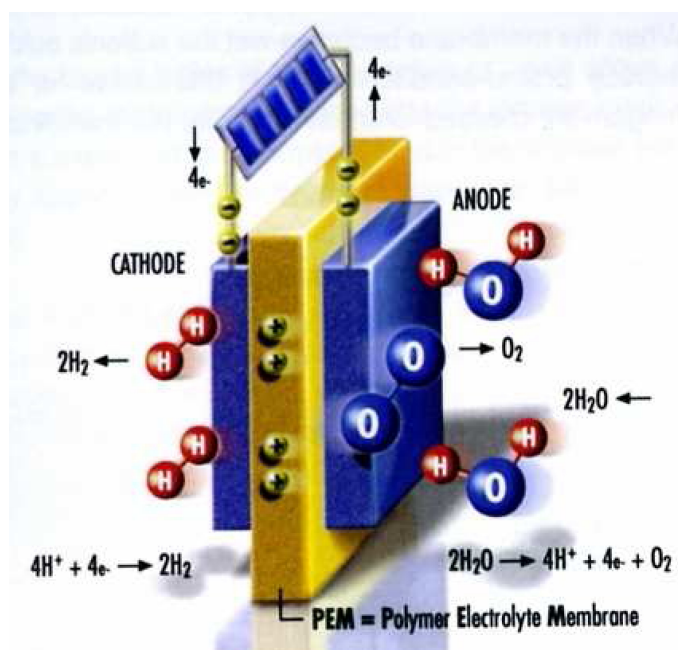
¹⁰Takto určená celková energie je jen dolní odhad energie, kterou lze maximálně z fotovoltaického článku získat. Ve skutečnosti je pracovní bod článku závislý na osvětlení a proto při změně intenzity slunečního svitu by bylo nutné pracovní bod operativně měnit.

Postup měření

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 jeden kalendářní den, případně za delší období.¹¹

4 Elektrolyzátor

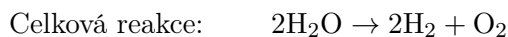
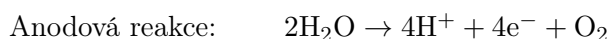
V elektrolyzátoru dochází k rozkladu molekul vody na vodík a kyslík. V praxi je k dispozici tzv. PEM elektrolyzátor, který k oddělení vodíku a kyslíku používá polymerové membrány (Polymer Electrolyte Membrane). PEM elektrolyzátor se skládá ze tří vrstev (viz obr. 8). Prostřední vrstva je membrána podobné struktury jako třeba teflon a je propustná pro protony. Tato vrstva je obklopena z obou stran kovovými elektrodami.



Obrázek 8: Schéma PEM elektrolyzátoru

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:



¹¹Optimální 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.

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 2,3 V pro jednoduchý elektrolyzér resp. 4,6 V pro elektrolyzér dvojité.

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.

Může se stát, že elektrolyzér působí jako zdroj napětí, proto ho nejprve necháme několik minut zkratovaný.

Do obvodu se zdrojem a elektrolyzérem připojíme proudový a napěťový senzor systému Pasco tak, abychom mohli měřit napětí na elektrolyzéru a proud, který obvodem protéká. Měříme závislost proudu na napětí v rozsahu cca 0,2 V–2,3 V (napětí lze ovládat pomocí programovatelného zdroje). 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.

Postup měření

Změřte voltampérovou charakteristiku elektrolyzéra podle uvedeného návodu. Hodnotu rozkladného napětí určete jako průsečík prodloužené lineární závislosti s osou napětí.

4.2 Měření účinnosti elektrolyzéra

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

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

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 $10,8 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}$.

Postup měření

Na elektrolyzér přiveďte napětí 2 V a po jistou vhodnou dobu nechte probíhat elektrolýzu (napětí lze ovládat pomocí programovatelného zdroje). Současně měřte napětí, proud a množství vzniklého plynu - hadičky vedoucí ke spalovacímu článku utěsněte, aby plyn nemohl ze zásobníků unikat. Z naměřených hodnot spočítejte účinnost elektrolýzy.

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

5 Palivový článek

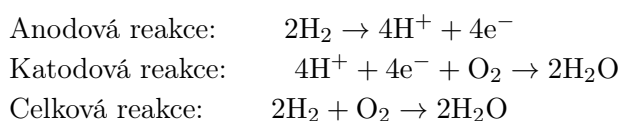
V palivovém článku dochází ke zpětnému sloučení vodíku s kyslíkem za vzniku vody. Současně ve vnějším obvodu vzniká elektrický proud. Palivový článek tedy umožňuje přímou přeměnu vazebné

energie vody na elektřinu a je tak alternativou ke spalování vodíku v plameni.

Konstrukce PEM palivového článku je podobná jako u PEM elektrolyzáru. 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.

$$\eta_p = \frac{E_{\text{el}}}{E_{\text{H}_2}} = \frac{\int_{t=0}^T U \cdot I dt}{V_{\text{H}_2} H}$$

Postup měření

Sestavený elektrický obvod přepojte tak, abyste měřili napětí na elektromotorku vrtule a proud jím tekoucí. Spustíte program pro měření proudu a napětí, uvolněte zajištění hadiček, vypustíte plyny do spalovacího článku. Měřte až do zastavení otáčení vrtulky. Protože výkon palivového článku kolísá, nechte si v softwaru vykreslit závislost výkonu na čase a celkovou získanou energii určete jako plochu pod křivkou.

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 odlišnost spektra žárovky od spektra slunečního při orientačním měření účinnosti solárního článku s žárovkou jako zdrojem světla. Přesto je takto získaná hodnota řádově správná a lze ji použít pro posouzení reálných možností masové aplikace tohoto procesu v energetice.

Úkoly

1. Z uvedených dříve naměřených účinností vypočítejte *celkovou* účinnost procesu získávání energie ze Slunce, její akumulace ve vodíku a následné přeměny na elektrickou energii.
2. Spočítejte následující příklad: Vyrábíme elektřinu pomocí solárních článků a akumulujeme ji ve vodíku. Jakou plochu by musely mít solární články, aby energie z roční výroby solárních článků akumulovaná do vodíku a následně přeměněná v elektřinu pomocí elektrolyzéru byla rovna roční produkci JE Temelín? Temelínská elektrárna má elektrický výkon 2 GW a pracuje asi 85 % doby v roce. Na 1 m² povrchu země v ČR dopadá za rok asi 1 000 kWh energie slunečního záření.

A Měření proudu a napětí s využitím čidel firmy Pasco

Používáme proudovou sondu (Current) a napěťovou sondu (Voltage). Taková sonda má vždy dvě zdířky či dva měřicí vodiče k zapojení do obvodu a jeden datový kabel, který se zapojí do USB vstupu počítače (druhá možnost je komunikace sondy s počítačem pomocí Bluetooth). Vlastní měření řídíme počítačem pomocí programu Pasco Capstone, ve kterém provádíme i zpracování dat naměřených těmito sondami.

Příprava na měření. Zapneme počítač a spustíme v něm program Pasco Capstone. Zapneme sondy, připojíme je k počítači (USB kabelem či bezdrátově) a nastavíme, aby se začátku měření vynulovaly. Sondy zapojíme do obvodu jako voltmetr a jako ampérmetr.

Program Pasco Capstone ukazuje okamžité hodnoty napětí a proudu na sondách. Můžeme si zvolit vhodné zobrazení několika oken a získat tak současně vykreslení voltampérové charakteristiky a závislosti výkonu na odporu.

Vlastní měření. V programu nastavíme vhodnou vzorkovací frekvenci a trvání měření. Měření spustíme. V případě měření pracovního bodu solárního článku měníme odpor ručně pomocí reostatu, v případě měření voltampérové charakteristiky rozkladného článku či pro výrobu vodíku rozkladným článkem používáme kromě čidel proudu a napětí i napájecí zdroj pro modulární obvody, který je programovatelný - lze na něm nastavit lineárně rostoucí průběh napětí anebo konstantní napětí po celou dobu měření.

B Program Qtiplot pro zpracování měření – tabulky a grafy

Zpracování dlouhodobého měření na venkovním solárním článku provádíme v programu Qtiplot. Naměřená data z programu Foxtrot importujeme do programu Qtiplot (podrobný návod v interaktivní osnově). Tabulku rozšíříme o další dva sloupce. V prvním z nich zadáme výpočet odporu – podíl napětí a proudu, ve druhém 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 v 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. Sloupec s časem označíme jako nezávislou proměnnou X (výběr sloupce a stisk ikony X), sloupec s výkonem označíme jako závislou proměnnou Y (výběr sloupce a stisk ikony Y). Tyto dva sloupce společně označíme – stisk záhlaví prvního a pak s přídrží tlačítka **CTRL** stisk záhlaví druhého sloupce. Nyní stiskneme ikonu pro vytvoření grafu typu čára. V programu najdeme záložku **Data** a v ní vyberme **Integrovat**. Upravíme časové meze tak, abychom integrovali přes dvacet čtyři hodin, a integraci provedeme. Určená celková energie je základem pro určení průměrného výkonu.

C Užití v praxi

Popsané měřicí postupy patří k základní diagnostice pro zjištění výstupních parametrů solárních a palivových struktur. Na jejich základě se hodnotí kvalita výroby a následné třídění článků pro další využití. Voltampérové charakteristiky jsou klíčové především pro správnou kategorizaci solárních článků před jejich propojením uvnitř solárního panelu. Jejich sério-paralelní spojení v panelu představuje proudovo-napěťový zdroj, kde je celkový výkon závislý na výkonu každého z připojených článků. Propojení článků se stejnými parametry je tedy nutností pro zajištění maximálního výkonu celého systému.