

---

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

---

jarní semestr 2022

### 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  $1373 \text{ W/m}^2$ , 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 organizmy nebo člověkem.

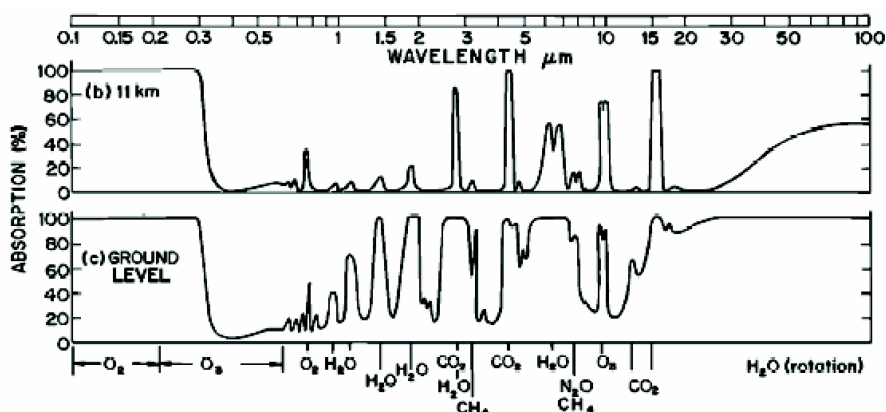
### 3 Fotovoltaický článek

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 přitažen 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 zapojíme do elektrického obvodu dle obr. 2 (jedná se o zapojení typu A z úlohy č. 3 tohoto praktika). Proměnný odpor realizujeme reostatem.

Přípravek s 24 V žárovku zapojíme do *zadních* zdírek zdroje Manson SPS9602. Na zdroji nastavíme napětí 20 až 24 V. (24 V je nominální napětí žárovky). Přípravek se žárovkou umístíme do vzdálenosti asi 30 cm od fotovoltaického článku tak, aby světlo dopadalo na článek kolmo. 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 A); data se přenášejí na počítač. Zpracování dat v podobě tabulek a grafů provádíme v programu Qtiplot (viz dodatek B).

Pro každou dvojici napětí a proudu vypočteme výkon  $P$  a odpor  $R$ . Vytvoříme graf závislosti výkonu na odporu; v tomto grafu určíme optimální pracovní bod jako hodnotu odporu v maximu výkonu. Vytvoříme graf závislosti proudu na napětí (voltampérovou charakteristiku).

## 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. Žářivý 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 patící žárovky jsou zanedbatelné), potom  $P_0 = U \cdot I$ , kde  $U$  a  $I$  je napětí na žárovce a proudu žárovkou; ty určíme z údajů na displeji zdroje Manson. Rozměry solárního článku a jeho vzdálenost od žárovky změříme svinovacím metrem.

Účinnost solárního článku pak spočítáme jako

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

kde  $P$  je elektrický výkon solárního článku při daném osvětlení, ideálně měřený v optimálním pracovním bodě.

### 3.2 Spektrální účinnost fotovoltaického článku

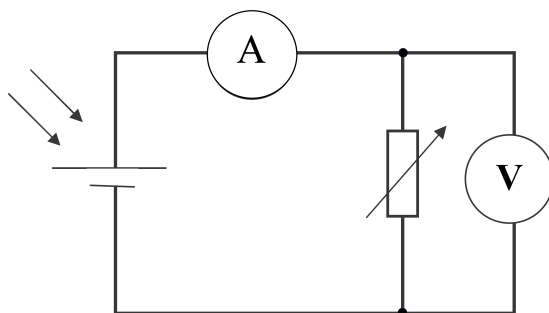
Fotovoltaický článek přemění část energie dopadajícího záření jen tehdy, pokud se foton absorbuje za vzniku páru elektron – díra. Šířka zakázaného pásu křemíku je 1,1 eV, což odpovídá energii dopadajícího fotonu s vlnovou délkou 1,1  $\mu\text{m}$ <sup>1</sup>. Tedy pouze ta část záření Slunce, jejíž vlnová délka je menší než 1,1  $\mu\text{m}$ , může být převedena na elektřinu<sup>2</sup>. 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 fotovoltaické články z jiných materiálů dosahují i výrazně vyšší účinnosti než křemíkové<sup>3</sup>.

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 1 100 nm<sup>4</sup>. 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.

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



Obrázek 2: Zapojení solárního článku pro měření VA charakteristiky

<sup>1</sup>Shoda čísel je pouze náhodná. Vyšší energie fotonu odpovídá jeho menší vlnové délce.

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

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

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

obr. 4, což je při interpretaci výsledků nutné vzít do úvahy.<sup>5</sup>

## Postup měření

K měření použijeme 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 mimo filtr.

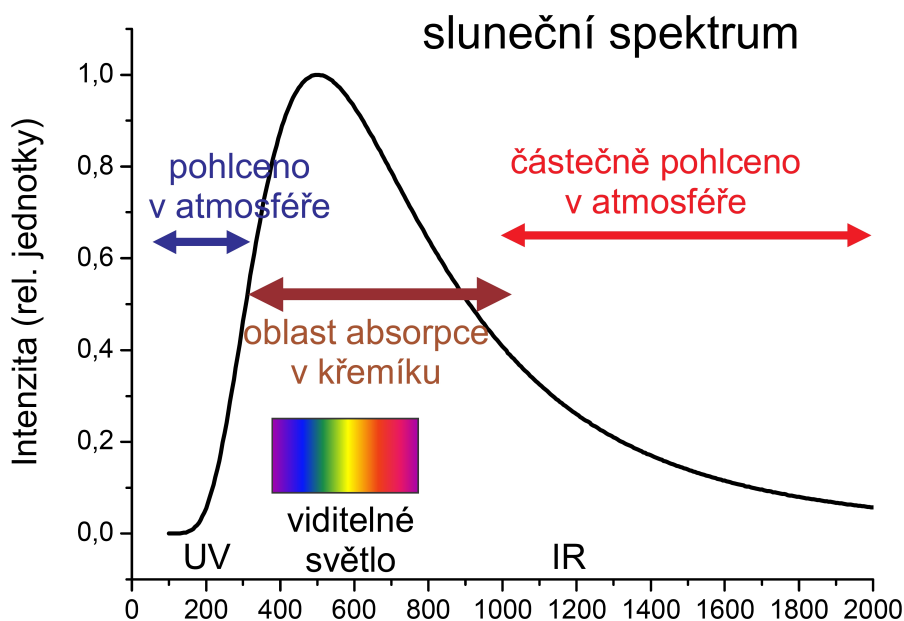
Solární článek osvětlíme halogenovou žárovkou. Výstup solárního článku připojíme na ampérmetr, budeme tedy měřit proud do zkratu. - Změříme proud nakrátko bez filtrů.

Do cesty světelnému svazku postupně klademe červený, zelený a modrý filtr, které vymezí vždy přibližně třetinu viditelné části spektra žárovky. - Změříme 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.

Barevné filtry jsou současně propustné i v infračervené oblasti, ve které křemíkový solární článek již pracuje<sup>6</sup>. 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.



Obrázek 3: Emisní spektrum Slunce s vyznačením významných oblastí. Na vodorovné stupnici je vlnová délka v  $nm$ .

<sup>5</sup>Problematika 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](http://www.pyrometry.com/farassociates_tungstenfilaments.pdf).

<sup>6</sup>Můžete 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.

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

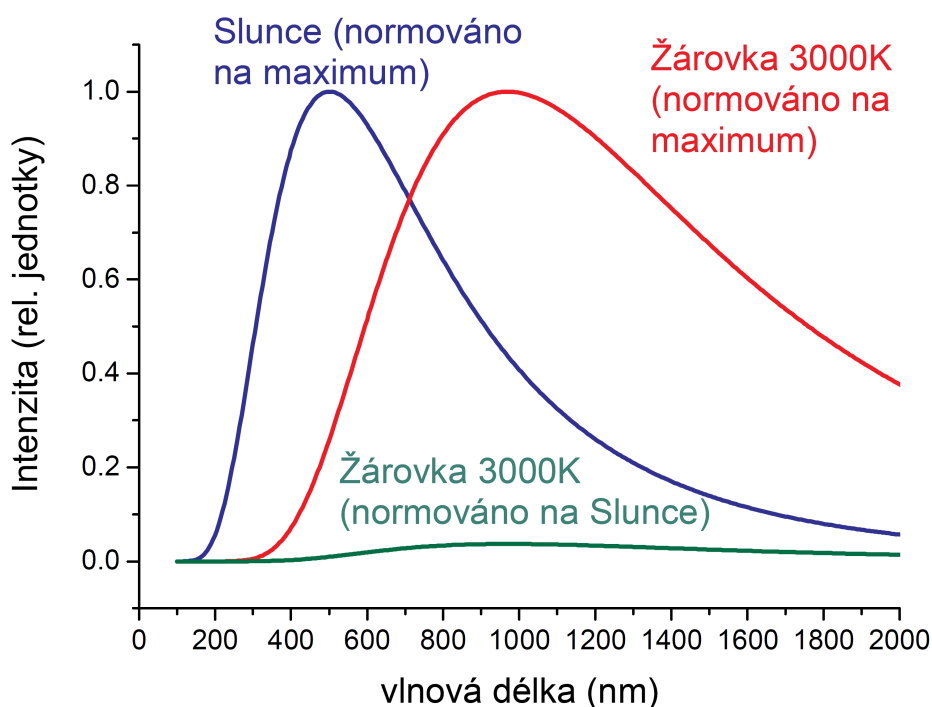
Na jižní straně budovy je z venkovní strany při okně umístěn fotovoltaický článek. Článek je připojen na programovatelný automat (PLC) Tecomat Foxtrot, který dovoluje jeho dlouhodobé měření.

- Foxtrot umožňuje pomocí dvou relé nastavit různá zapojení článku -
  1. na odporovou zátěž, která je přibližně optimální pro dosažení maximálního výkonu
  2. nakrátko
  3. naprázdno
 Přitom 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>.

#### Krátkodobá měření na fotovoltaickém článku

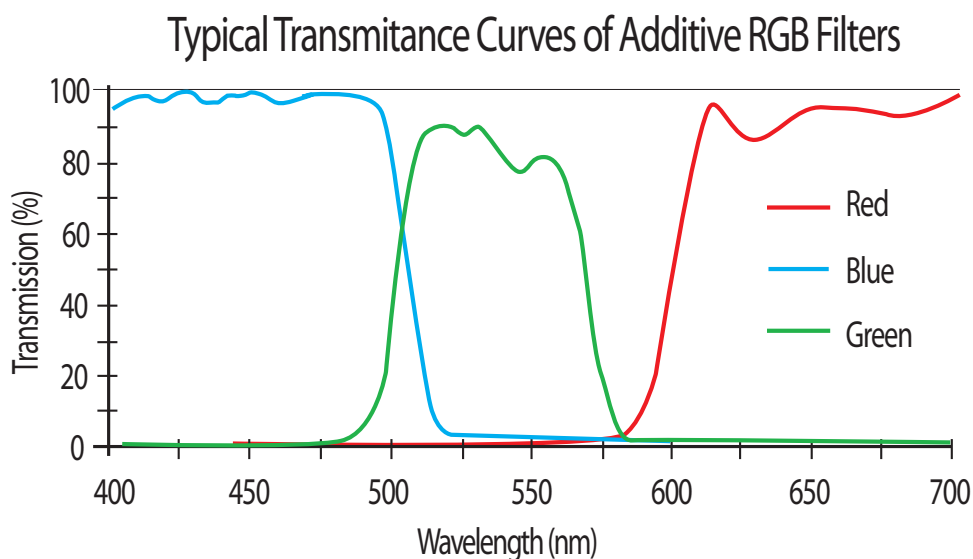
Přímo na krabičce Foxtrotu si zobrazíme stránku s údajem o napětí a proudu z článku. Můžeme sledovat, jak se údaje mění v čase - podle toho, jak se mění přirozený sluneční osvit článku. Můžeme také otevřít okno, část panelu zakrýt a zjistit, jak to ovlivní napětí a proud.<sup>7</sup>

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

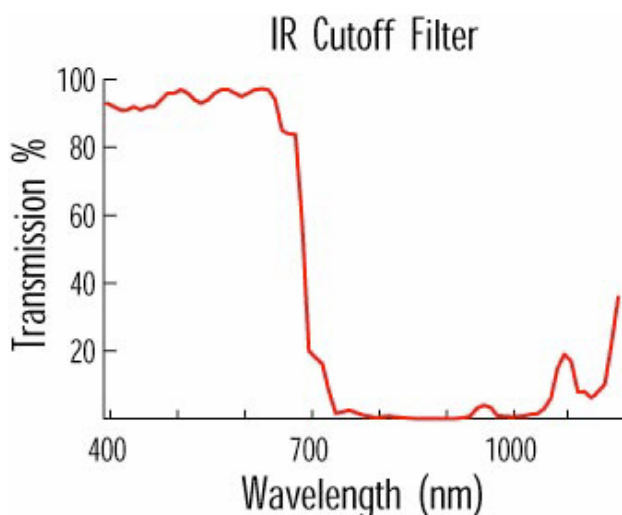


Obrázek 4: Srovnání slunečního spektra a spektra halogenové žárovky

<sup>7</sup>Toto 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.



Obrázek 5: RGB filtry



Obrázek 6: IR-cut filtr

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.<sup>8</sup>

#### 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.

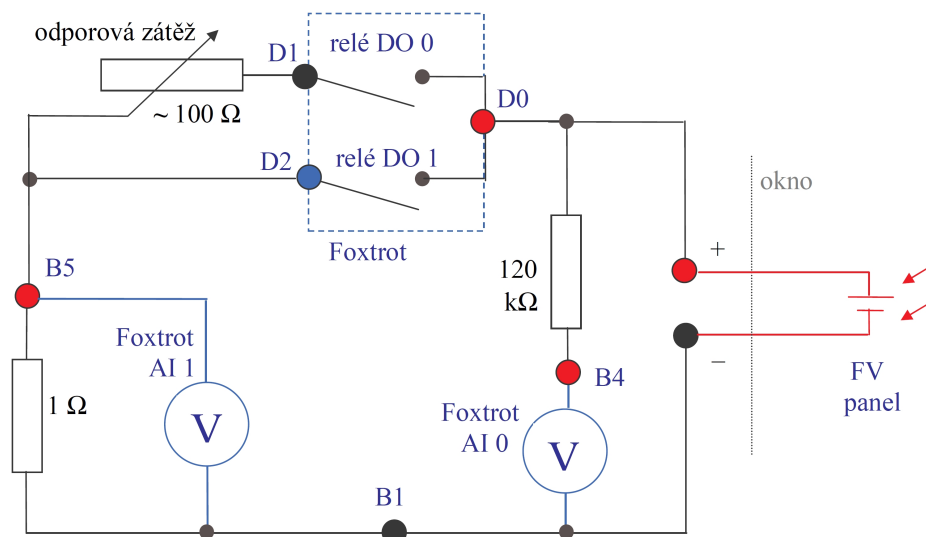
Sledujte vliv zastínění na napětí naprázdno a na proud nakrátko.

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

Po měření nastavte na Foxtrotu opět odporovou zátěž.<sup>9</sup>

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

<sup>9</sup>Pro dlouhodobé měření má být nastavena odporová zátěž.



Obrázek 7: Schéma – fotovoltaický panel

### 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.<sup>10</sup>

### Postup měření

Ve vhodném programu, například QtiPlot, proveďte integraci a vypočtete celkovou energii získanou za sledované období, například následujícím postupem: Označíme-li jednotlivá měřená napětí  $U_i$  a proudy  $I_i$ , je celková energie<sup>11</sup> rovna:

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

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

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

kde  $n$  je celkový počet měření.

## 4 Elektrolyzér

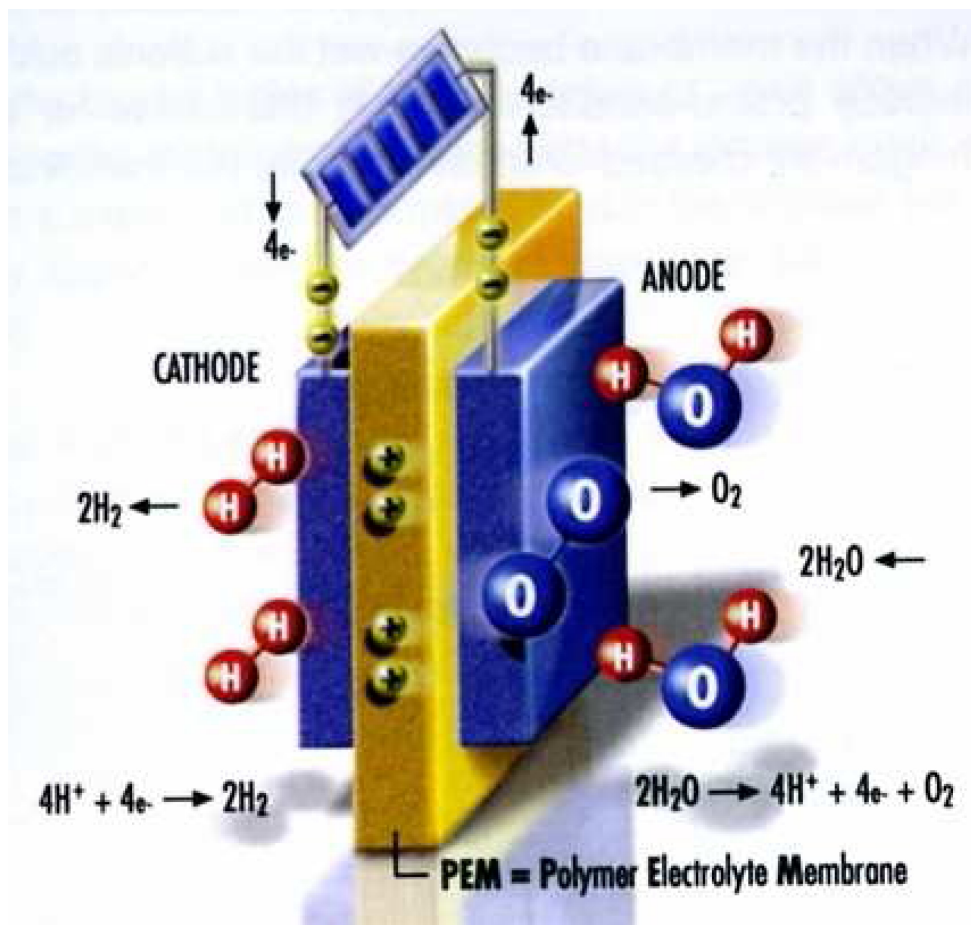
V elektrolyzérovi dochází k rozkladu molekul vody na vodík a kyslík. V praxi je k dispozici tzv. PEM elektrolyzér, který k oddělení vodíku a kyslíku používá polymerové membrány (Polymer Electrolyte Membrane). PEM elektrolyzér se skládá ze tří vrstev (viz obr. 8). Prostřední vrstva je

<sup>10</sup>Optimální 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.

<sup>11</sup>Takto 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.



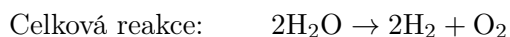
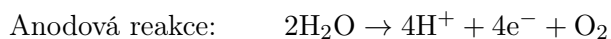
membrána podobné struktury jako třeba teflon a je propustná pro protony. Tato vrstva je obklopena z obou stran kovovými elektrodami.



Obrázek 8: Schéma PEM elektrolyzéro

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:



#### 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 elektrolyzéro připojíme zdroj napětí, kladný pól na červenou



svorku.

**POZOR! Napětí na zdroji nesmí přesáhnout 2,3 V pro jednoduchý elektrolyzátor resp. 4,6 V pro elektrolyzátor dvojitý .**

Po připojení zdroje při určité hodnotě napětí začne horními hadičkami z elektrolyzátoru 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 elektrolyzátoru.

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

Do obvodu se zdrojem a elektrolyzátor připojíme proudový a napěťový senzor systému Vernier (High Current Sensor, Differential Voltage) tak, abychom mohli měřit napětí na elektrolyzátoru a proud, který obvodem protéká. Měříme závislost proudu na napětí v rozsahu 1 V–2,3 V. Při zvyšování napětí nejprve elektrolyzátor proud neprotéká. Teprve až po dosažení hodnoty tzv. rozkladného napětí, začne elektrolytický rozklad molekul vody a elektrolyzátor protéká proud. Současně pozorujeme unikání plynů do zásobníků. Nad rozkladným napětím roste proud v závislosti na napětí přibližně lineárně. Hodnotu rozkladného napětí určíme jako průsečík prodloužené lineární závislosti s osou napětí.

#### 4.2 Měření účinnosti elektrolyzátoru

Účinností elektrolyzátoru 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  $V_{\text{H}_2}$  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 elektrolyzátor přivedeme napětí 2 V a po jistou vhodnou dobu necháme probíhat elektrolýzu. Současně měříme napětí, proud a množství vzniklého plynu. Z naměřených hodnot spočítáme účinnost elektrolýzy.

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

## 5 Palivový článek

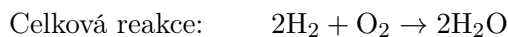
V palivovém článku dochází ke zpětnému sloučení vodíku s kyslíkem za vzniku vody. Současně ve vnějším obvodu vzniká elektrický proud. Palivový článek tedy umožňuje přímou přeměnu vazebné energie vody na elektřinu a je tak alternativou ke spalování vodíku v plameni.

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

$$\eta_p = \frac{E_{\text{el}}}{E_{\text{H}_2}} = \frac{UIt}{V_{\text{H}_2}H}$$

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

$$E_i = U_i I_i \Delta t$$

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

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

## 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 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.

## Tématické bloky úkolů

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

### Studium vlastností solárního článku, na který dopadá světlo žárovky

1. Změřte voltampérovou charakteristiku solárního článku a určete jeho optimální pracovní bod (návod odst. 3.1).
2. Spočítejte 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).

### 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).

### 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).

### 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 vypočítejte 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 1 m<sup>2</sup> povrchu země v ČR dopadá za rok asi 1 000 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 zapojen do počítače datovým kabelem s USB konektorem. 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 a proudovou sondu – měřicí vodiče z napěťové sondy zkratujeme (přiložíme k sobě) a v programu Logger Lite stiskneme tlačítko `Nulovat`. U proudové sondy vodiče při nulování necháme rozpojené. Sondy zapojíme do obvodu jako voltmetr a jako ampérmetr.

Pro měření proudu elektrolyzérem použijeme proudovou sondu s rozsahem do 10 A.

**Etapa počátečního průzkumu.** Program Logger Lite ukazuje okamžité hodnoty napětí a proudu na sondách. Při studiu zatěžovací charakteristiky fotovoltaického článku měníme hodnotu odporu reostatu a sledujeme, jak se mění proud a napětí. Můžeme si načíst vhodné rozložení oken z šablony v adresáři `C:\vyuka`.

**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. Stejným způsobem proměříme i jiné úkoly.

## 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 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. Stanovení nezávisle proměnné  $X$  a závisle proměnné  $Y$  pro graf. Sloupec s odporem 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 přídrží tlačítka `CTRL` stisk záhlaví druhého sloupce. Nyní stiskneme ikonu pro vytvoření grafu typu čára + symbol.

Z grafu určíme, pro jaký odpor je výkon maximální - optimální pracovní bod fotovoltaického článku.

## C Užítí 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.