

## VYUŽITIE FOTOVOLTAIKY NA VÝROBU VODÍKA ELEKTROLÝZOU VODY

ALEXANDRA KLENOVČANOVÁ,  
TOMÁŠ BRESTOVIČ a IVAN IMRIŠ

*Katedra energetickej techniky, Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice, Slovenská republika*  
Alexandra.Klenovcanova@tuke.sk

Došlo 23.8.07, prepracované 23.9.08, prijaté 23.4.09.

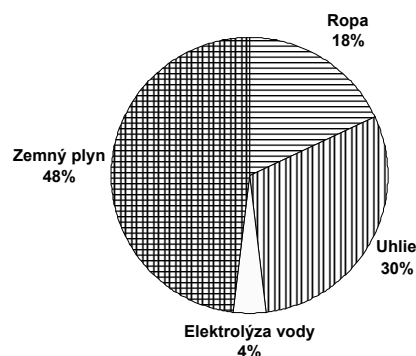
Kľúčové slová: fotovoltaika, alternatívne palivo, vodík, elektrolýza vody, PEM elektrolýzér

### Obsah

1. Úvod
2. Fotovoltaika ako zdroj elektrickej energie potrebnej pre elektrolýzu vody
  - 2.1. Inštalácia a princíp zapojenia fotovoltaického panela do celkovej schémy výroby vodíka
  - 2.2. Voltampérová charakteristika fotovoltaického panela na báze hydrogenovaného amorfného kremíka
3. Výroba vodíka elektrolýzou vody
  - 3.1. Výpočet účinnosti elektrolýzy vody
  - 3.2. Voltampérová charakteristika PEM elektrolýzéra
  - 3.3. Experimentálne skúšky elektrolýzy vody pri rôznej intenzite slnečného žiarenia
4. Diskusia
5. Záver

### 1. Úvod

Vodík je tretím najrozšírenejším prvkom na Zemi, kde sa vyskytuje predovšetkým ako voda a tiež ako súčasť organických zlúčenín. Z hľadiska energetického využitia môžeme vodík zaradiť medzi perspektívne alternatívne palivá, o ktoré je v súčasnosti obrovský záujem jednak z dôvodu ochrany životného prostredia ako aj v dôsledku nárastu spotreby energií, čím dochádza k postupnému vyčerpávaniu zásob fosílnych palív, a teda aj k nárastu cien ich derivátov. Energeticky sa vodík na Slovensku využíval už v druhej polovici 19. storočia, keď ľudia v domácnosti spaľovali predovšetkým svietyplýn, ktorý obsahoval 40 až 60 % vodíka. V súčasnosti sa vodík vo svete využíva predovšetkým v chemickom priemysle na výrobu amoniaku, v petrochemickom priemysle pri rafinácii ropy a v metalurgickom priemysle pri výrobe a rafinácii kovov, čiastoč-



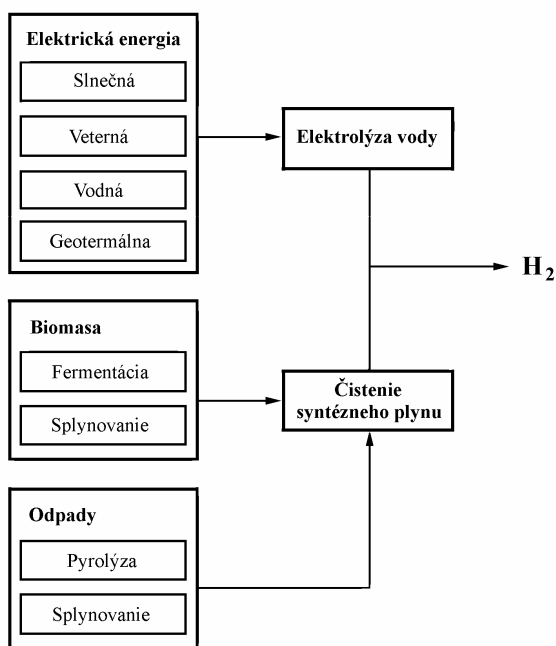
Obr. 1. Spôsoby výroby vodíka

ne sa využíva na výrobu metanolu a len malá časť sa zatiaľ využíva ako palivo. Existujú dva spôsoby využitia vodíka ako paliva. Jedným je spaľovanie vodíka, napr. v spaľovacích motoroch alebo kotloch a druhým je jeho využitie v palivových článkoch. V oboch prípadoch je produktom ekologicky nezávadná voda alebo vodná para. Vzhľadom na to, že elementárny vodík sa v prírode nachádza len v malom množstve, nepredstavuje energetický zdroj a pre energetické účely sa musí vyrábať premenou vhodnej suroviny s použitím inej energie. Vodík je teda len nositeľom energie, ktorý má veľmi dobrú vlastnosť, že pomocou neho sa dá energia akumulovať.

V súčasnosti sa vo svete až 96 % vodíka vyrába termochemicky z fosílnych palív, a to predovšetkým zo zemného plynu. Z termochemických spôsobov sa na výrobu vodíka najčastejšie používa parné reformovanie, ktoré spočíva v štiepení (reformovaní) uhlíkovodíkov z fosílnych palív vodnou parou. Na výrobu vodíka elektrolýzou vody je potrebné zabezpečiť obrovské množstvo lacnej alebo prebytočnej elektrickej energie, a tak sa v súčasnosti elektrolýzou vody vyrábajú len 4 % vodíka (obr. 1, cit.<sup>1</sup>).

Avšak vzhľadom na nutnosť šetriť primárne energetické zdroje a environmentálne problémy termochemickej výroby vodíka súvisiace predovšetkým s produkciou CO<sub>2</sub> je možné predpokladať, že pri neustálom rozširovaní výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov sa výroba vodíka elektrolýzou vody bude čím ďalej tým viac rozširovať. Elektrickú energiu potrebnú na elektrolýzu vody je možné získavať z primárnych a sekundárnych obnoviteľných zdrojov energie, tak ako znázorňuje obr. 2.

Z obr. 2 vidno, že vodík je možné z obnoviteľných zdrojov energie vyrábať buď elektrolýzou vody, pričom elektrickú energiu potrebnú na tento proces je možné získať premenou slnečnej, vodnej, veternej alebo geotermálnej energie alebo sa vodík získava pri čistení syntézneho plynu, ktorý vzniká pri fermentácii a splynovaní biomasy alebo pri pyrolýze a splynovaní odpadov. Medzi perspektívne spôsoby výroby vodíka elektrolýzou vody patrí využívanie slnečnej energie, pomocou ktorej sa elektrická energia produkuje v čase jej nižšej spotreby, napríklad cez deň, a tak by výroba vodíka v podstate predstavovala aku-



Obr. 2. Možnosti výroby vodíka za použitia obnoviteľných zdrojov energie

muláciu slnečnej energie, ktorá by sa dala využívať aj v čase jej vyššej spotreby napríklad v noci.

## 2. Fotovoltaika ako zdroj elektrickej energie potrebnej pre elektrolýzu vody

Premena slnečnej energie priamo na elektrickú energiu sa uskutočňuje pomocou fotovoltaických článkov na princípe vnútorného fotoelektrického javu, pri ktorom dochádza po dopade slnečného žiarenia k uvoľneniu viazaných elektrónov v polovodiči. Vnútorným fotoelektrickým javom sa síce zvýši vodivosť polovodiča, ale nikdy sa nevytvorí potenciálový rozdiel. Potenciálový rozdiel sa vytvorí buď nerovnomerným osvetlením polovodiča, alebo vytvorením článku, tak, že sa spoja dva polovodiče s rôznym typom vodivosti alebo spojením polovodiča s kovom. Najpoužívanejším polovodičovým materiálom na výrobu fotovoltaických článkov sú monokryštály kremíka, pričom účinnosť týchto monokryštalických kremíkových článkov dosahuje hodnoty 16 % (v laboratórnych podmienkach až 24 %). Výroba fotovoltaických článkov z monokryštálov kremíka je drahá a energeticky náročná, a tak sa vývoj zamerá na lacnejšie technológie. Medzi lacnejšie typy fotovoltaických kremíkových článkov patria články vyrobené z polykryštalického kremíka, ktorých účinnosť premeny slnečnej energie na elektrickú sa pohybuje v intervale od 12 do 14 %.

V súčasnosti sa presadzujú na trhu tiež tenkovrstvové fotovoltaické články vyrobené na báze amorfného kremí-

ka. Čistý amorfný kremík je z hľadiska štruktúry na výrobu fotovoltaických článkov nevhodný, a preto sa používa hydrogenovaný amorfný kremík (a-Si:H). Výhody použitia hydrogenovaného amorfného kremíka pre fotovoltaické články ako lacného materiálu vyplývajú z jeho optoelektronických vlastností. Z porovnania závislosti optickej absorpčnej konštanty od vlnovej dĺžky dopadajúceho slnečného žiarenia pre monokryštalický kremík a hydrogenovaný amorfný kremík vyplýva, že hodnoty absorpčnej optickej konštanty vo viditeľnej časti spektra pre hydrogenovaný amorfný kremík sú oveľa vyššie ako pre monokryštalický kremík, čo znamená, že vo fotovoltaickom článku vyrobenom na báze hydrogenovaného amorfného kremíka sa značná časť dopadajúceho slnečného žiarenia absorbuje už vo veľmi tenkej vrstve polovodiča, ktorá sa nanáša na lacný podklad, napr. sklo, oceľ alebo plast. Výroba takýchto fotovoltaických článkov je síce lacnejšia ako výroba fotovoltaických článkov z monokryštalického a polykryštalického kremíka, ale ich účinnosť premeny slnečnej energie na elektrickú je nízka a pohybuje sa len od 3 do 7 % (cit. <sup>1,2</sup>).

Okrem výroby kremíkových fotovoltaických článkov sa testujú aj iné materiály, s ktorými sa teoreticky dá dosiahnuť vyššia účinnosť premeny slnečnej energie na elektrickú ako u kremíkových fotovoltaických článkov, avšak v súčasnosti sa v praxi v širšej miere nevyužívajú. Pre získanie vyššieho napätia alebo prúdu s vyššou intenzitou sa fotovoltaické články spájajú do fotovoltaických panelov.

### 2.1. Inštalácia a princíp zapojenia fotovoltaického panela do celkovej schémy výroby vodíka

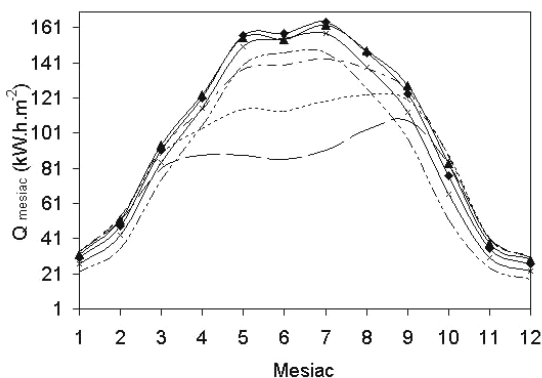
Za účelom premeny energie slnečného žiarenia na elektrickú energiu, ktorá je následne potrebná na výrobu vodíka elektrolýzou vody je na Katedre energetickej techniky Strojnickej fakulty Technickej univerzity v Košiciach nainštalovaný fotovoltaický panel na báze hydrogenovaného amorfného kremíka, ktorého technické parametre dané výrobcom sú uvedené v tab. I.

Medzi charakteristické hodnoty fotovoltaického panela patrí prúd nakrátko ( $I_{SC}$ ) a napätie naprázdno ( $U_{OC}$ ). Prúd nakrátko  $I_{SC}$  je maximálny prúd, ktorý môže fotovol-

Tabuľka I

Technické parametre pre fotovoltaický panel na báze amorfného kremíka

Parameter	Hodnota
Maximálny výkon $P_{max}$ , W	51
Plocha fotovoltaického panela, m <sup>2</sup>	0,78
Napätie naprázdno $U_{OC}$ , V	25
Prúd nakrátko $I_{SC}$ , A	3,3
Maximálne prevádzkové napätie $U_{pmax}$ , V	17,6
Maximálny prevádzkový prúd $I_{pmax}$ , A	2,6

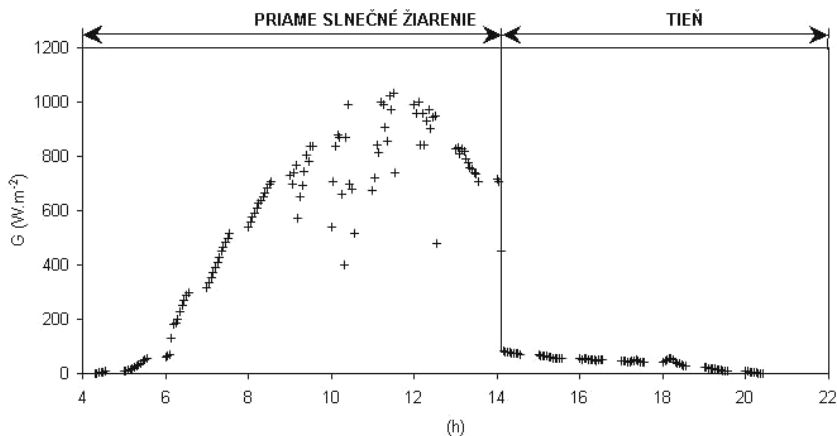


Obr. 3. Priebek priemernej energie slnečného žiarenia dopadajúcej na rôzne sklonené plochy orientované na juh počas roka pre Košice pri znečistení atmosféry  $Z = 3$ ;  $\blacktriangle$  – 45°,  $\blacklozenge$  – 30°,  $\text{---}$  0°,  $\text{---x}$  – 15°,  $\text{---}$  60°,  $\text{---}$  75°,  $\text{---}$  90°

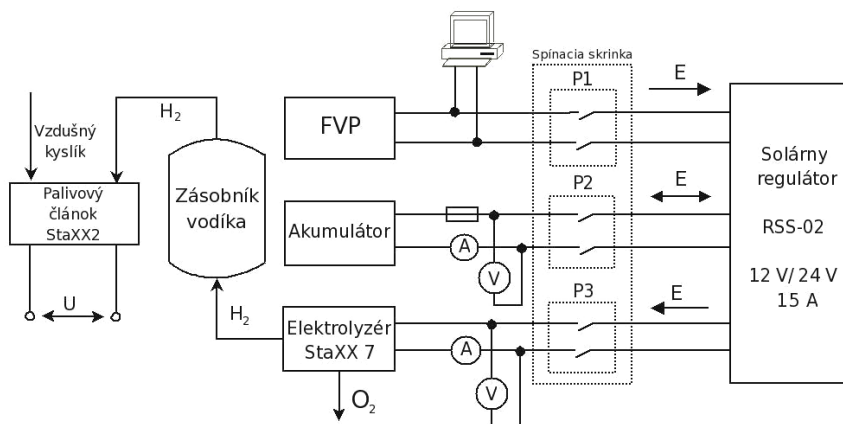
taický panel pri danom ožiarení dodávať. Napätie naprázdno  $U_{OC}$  je maximálne napätie, ktoré sa dosahuje, keď na fotovoltaický panel nie je pripojený žiadny spotrebič. Z tab. I vyplýva, že maximálny výkon, ktorý môže fotovoltaický panel dodávať, je 51 W. Tento dodávaný výkon sa však mení v závislosti od intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na fotovoltaický panel počas dňa, pretože práve svetlom sa uvoľňujú elektróny pre elektrický prúd. Priebek intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na nainštalovaný fotovoltaický panel je meraný pomocou pyranometra a namerané hodnoty sú zaznamenávané dátovou zbernicou systému.

Na základe priebehu priemernej energie slnečného žiarenia dopadajúcej na rôzne sklonené plochy orientované na juh počas roka pre Košice pri znečistení atmosféry  $Z = 3$ , tak ako to znázorňuje<sup>1,3</sup> obr. 3 bol fotovoltaický panel inštalovaný so sklonom 45°.

Na obr. 4 je znázornený príklad nameraného priebehu intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na fotovoltaic-



Obr. 4. Priebek intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na fotovoltaický panel umiestnený na Katedre energetickej techniky Strojnickej fakulty TU v Košiciach počas polooblačného dňa



Obr. 5. Celková schéma výroby vodíka; FVP – fotovoltaický panel, P1, P2, P3 – prepínač, E – tok elektrickej energie

ký panel na báze hydrogenovaného amorfného kremíka počas polooblačného dňa.

Z obr. 4 vyplýva, že fotovoltaický panel je umiestnený tak, že naň dopadá priame slnečné žiarenie len v dopoludňajších hodinách a v popoludňajších hodinách je v tieni budovy. V popoludňajších hodinách, teda výkon panela klesá a elektrolýza vody prebieha pomocou elektrickej energie dodávanej z akumulátora. Pri experimentálnom meraní množstva vyrobeného vodíka v závislosti od intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na fotovoltaický panel bola použitá schéma zapojenia podľa obr. 5, ktorá popisuje celkový meraný systém a možnosti toku elektrickej energie.

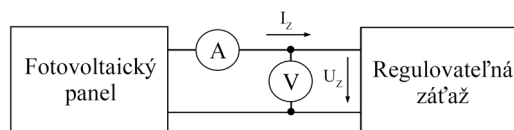
Tok elektrickej energie medzi fotovoltaickým panelom, akumulátorom a elektrolýzom je riadený pomocou solárneho regulátora. Elektrolýza vody prebieha pomocou elektrickej energie dodanej z fotovoltaického panela do vtedy, kým dodávaný výkon, resp. napätie na svorkách panela neklesne pod hodnotu napätia na svorkách akumulátora. V danom okamihu sa začne dodávať zvyšná časť elektrickej energie potrebnej na chod elektrolýzera z akumulátora. Systém začne pracovať v kombinovanej prevádzke a udrží tak elektrický prúd na svorkách elektrolýzera na približne konštantnej hodnote. Naopak pri zvýšení a špičkovom výkone fotovoltaického panela zabezpečí regulátor maximálny prúd pre elektrolýzu a zvyšná časť získanej elektrickej energie sa využije na dobíjanie akumulátora. Pri dostatočnom osvetlení fotovoltaického panela alebo pri dostatočne nabitom akumulátore pripojí solárny regulátor do elektrického obvodu elektrolýzer. Vodík vyrobený elektrolýzou vody je uskladnený a následne využívaný v palivovom článku.

## 2.2. Voltampérová charakteristika fotovoltaického panela na báze hydrogenovaného amorfného kremíka

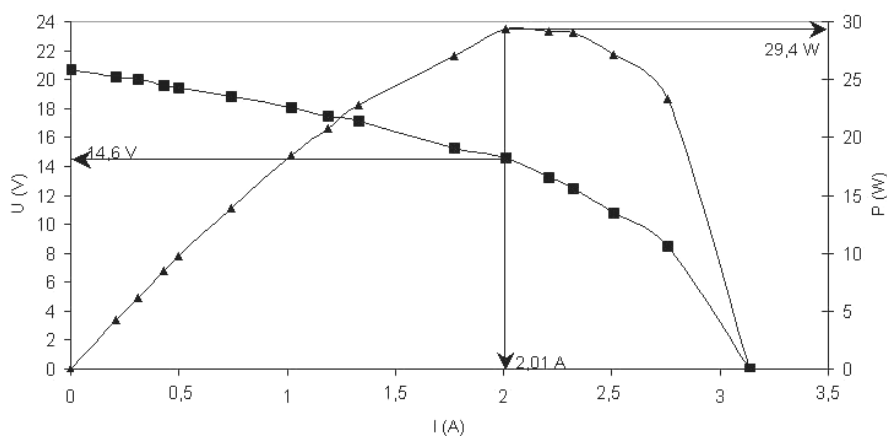
Pre určenie účinnosti premeny slnečnej energie na elektrickú energiu pomocou nainštalovaného fotovoltaického panela na báze hydrogenovaného amorfného kremíka bola nameraná jeho voltampérová charakteristika počas slnečného bezoblačného dňa pri priemernej hodnote intenzity slnečného žiarenia  $1047 \text{ W m}^{-2}$ . Schéma zapojenia pre meranie voltampérovej charakteristiky je znázornená na obr. 6.

Pre získanie voltampérovej charakteristiky fotovoltaického panela boli zaťažené jeho výstupné svorky a bol meraný elektrický prúd a napätie pri takmer konštantnej intenzite slnečného žiarenia. Ako regulovateľná záťaž bol použitý prúdový stabilizátor s výstupnými svorkami zapojenými nakrátko. Pri meraní sa znižoval celkový ohmický odpor záťaže, čím sa zvyšoval pretekajúci elektrický prúd. Nameraná voltampérová charakteristika je spolu s vypočítanou výkonovou charakteristikou graficky znázornená na obr. 7.

Z nameranej voltampérovej charakteristiky vyplýva, že počas slnečného bezoblačného dňa pri priemernej hod-



Obr. 6. Schéma zapojenia pre meranie voltampérovej charakteristiky fotovoltaického panela na báze hydrogenovaného amorfného kremíka



Obr. 7. Voltampérová charakteristika a výkonová charakteristika fotovoltaického panela na báze hydrogenovaného amorfného kremíka; —■— voltampérová charakteristika, —▲— výkonová charakteristika

note intenzity slnečného žiarenia  $G = 1047 \text{ W m}^{-2}$  je fotovoltaickým panelom dodávaný maximálny výkon  $29,4 \text{ W}$ . Účinnosť premeny slnečnej energie na elektrickú energiu vo fotovoltaickom paneli vypočítame podľa vzťahu (1):

$$\eta_p = \frac{I_M \cdot U_M}{S \cdot G} \quad (1)$$

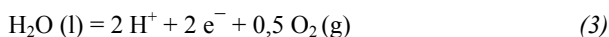
Z nameraných hodnôt prúdu  $I_M = 2,01 \text{ A}$  a napätia  $U_M = 14,6 \text{ V}$ , ktoré odpovedajú maximálnemu výkonu fotovoltaického panela o ploche  $S = 0,78 \text{ m}^2$  pri priemernej intenzite slnečného žiarenia  $G = 1047 \text{ W m}^{-2}$  dostávame účinnosť premeny slnečnej energie na elektrickú energiu vo fotovoltaickom paneli  $3,6 \%$ .

### 3. Výroba vodíka elektrolýzou vody

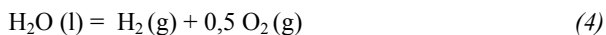
Elektrolýza vody je elektrochemický oxidačno-redukčný dej, pri ktorom sa pomocou dodanej elektrickej energie voda elektrolyticky rozkladá na vodík a kyslík. V procese elektrolýzy vody sa vodík vylučuje na katóde podľa reakcie (2):



Na anóde sa vylučuje ekvivalentné množstvo kyslíka (3):



Sčítaním reakcií (2) a (3) dostaneme sumárnu rovnicu rozkladu vody (4), pričom zo zmeny štandardnej mólovej entalpie  $\Delta H_{298}^{\circ}$  vyplýva, že reakcia je endotermická:



$$\Delta H_{298}^{\circ} = 286 \text{ 030 J mol}^{-1}$$

Zmenu štandardnej Gibbsovej energie<sup>4,5</sup> pre reakciu (4) vypočítame podľa vzťahu (5):

$$\Delta G_{298}^{\circ} = \Delta H_{298}^{\circ} - T \cdot \Delta S_{298}^{\circ} \quad (5)$$

kde pre zmenu štandardnej mólovej entropie platí:

$$\Delta S_{298}^{\circ} = S_{298}^{\circ} (\text{ H}_2 (\text{ g})) + 0,5 \cdot S_{298}^{\circ} (\text{ O}_2 (\text{ g})) - S_{298}^{\circ} (\text{ H}_2\text{O} (\text{ l})) \quad (6)$$

$$\Delta S_{298}^{\circ} = 163,27 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

Po dosadení zmeny štandardnej mólovej entalpie  $\Delta H_{298}^{\circ} = 286 \text{ 030 J mol}^{-1}$  a zmeny štandardnej mólovej entropie  $\Delta S_{298}^{\circ} = 163,27 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  do vzťahu (5) dostávame:  $\Delta G_{298}^{\circ} = 237 \text{ 376 J mol}^{-1}$  (7)

Z uvedeného výpočtu vyplýva, že pri elektrolýze vody sa zvýši Gibbsova energia o hodnotu  $237 \text{ 376 J mol}^{-1}$  a entropia sústavy o  $163,27 \text{ J K}^{-1}$ . Z kladnej zmeny entropie vyplýva, že počas chemickej reakcie sa v sústave znižuje usporiadanie, takže pri elektrolytickom rozklade vody

sa musí sústave dodať energia ekvivalentná  $\Delta H_{298}^{\circ}$ . Podľa vzťahu (7) je teda na elektrolýzu vody potrebné dodať na vylúčenie jedného mólu  $\text{ H}_2$  energiu  $237 \text{ 376 J}$  vo forme elektrickej energie a pri izotermickom procese sa musí z okolia priviesť teplo  $48 \text{ 654 J}$ .

Z hodnoty zmeny štandardnej Gibbsovej energie bolo vypočítané reverzibilné napätie pri štandardných podmienkach ( $298 \text{ K}$ ,  $101 \text{ 325 Pa}$ )<sup>6</sup>:

$$U_{\text{rev}} = \frac{\Delta G_{298}^{\circ}}{n \cdot F} = \frac{237376}{192969,12} = 1,23 \text{ V} \quad (8)$$

kde  $n$  je počet vymenených nábojov a  $F$  je Faradayova konštanta  $96 \text{ 484,56 C mol}^{-1}$ .

Pri tomto napätí je výťažok elektrolýzy nulový, a preto ak majú v elektrolýze prebiehať elektrochemické reakcie s určitou požadovanou rýchlosťou a účinnosťou, musí cez elektrolýzer pretekať primerane veľký prúd, a teda musíme zvýšiť napätie článku.

Ďalšou dôležitou hodnotou napätia pre priebeh elektrolýzy vody v elektrolýzéroch je hodnota termoneutrálneho napätia. Pre hodnotu termoneutrálneho napätia, pri ktorom elektrolýzer pracuje autotermne, teda celková energia dodávaná vo forme elektrického prúdu sa pri uvedenom napätí využije na udržanie izotermického priebehu elektrolýzy pri štandardných podmienkach ( $298 \text{ K}$ ,  $101 \text{ 325 Pa}$ ) platí:

$$U_m = \frac{\Delta H_{298}^{\circ}}{n \cdot F} = \frac{286030}{2.96484,56} = 1,48 \text{ V} \quad (9)$$

Pokiaľ elektrolýzer pracuje pri teplote  $298 \text{ K}$  pri napätí v intervale  $1,23$  až  $1,48 \text{ V}$ , odoberá z okolia teplo, a naopak pri vyššom napätí ako  $1,48 \text{ V}$  teplo do okolia odovzdáva a elektrolýzer alebo elektrolyt je potrebné chlaďiť.

#### 3.1. Výpočet účinnosti elektrolýzy vody

Účinnosť elektrolýzy vody prebiehajúcej v elektrolýzere pri danom tlaku, teplote a intenzite slnečného žiarenia dopadajúceho na fotovoltaický panel môžeme vypočítať ako podiel chemickej  $E_{\text{ch}}$  a elektrickej energie  $E_{\text{el}}$  potrebnej na vylúčenie vodíka (10):

$$\eta_{\text{el}} = \frac{E_{\text{ch}}}{E_{\text{el}}} \quad (10)$$

Chemická energia potrebná na vylúčenie vodíka elektrolýzou je daná vzťahom (11):

$$E_{\text{ch}} = n \cdot \Delta H_{298}^{\circ} \quad (11)$$

kde  $n$  je množstvo vylúčeného vodíka v móloch a  $\Delta H_{298}^{\circ} = 286 \text{ 030 J mol}^{-1}$

Množstvo vylúčeného vodíka v móloch  $n$  pri danom tlaku a teplote vypočítame zo stavovej rovnice ideálneho plynu:

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad (12)$$

kde  $p$  je atmosferický tlak (Pa),  $T$  je pracovná teplota (K),  $V$  je množstvo nameraného vylúčeného vodíka ( $\text{m}^3$ ) a  $R$  je univerzálna plynová konštanta  $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Množstvo elektrickej energie spotrebovanej na elektrolýzu vody vypočítame podľa vzťahu (13):

$$E_{\text{el}} = U \cdot I \cdot \tau \quad (13)$$

kde  $U$  je napätie na svorkách elektrolyzéra (V),  $I$  je prúd dodávaný fotovoltaickým panelom a  $\tau$  je čas trvania elektrolýzy (s).

Po dosadení vzťahov (11), (12) a (13) do vzťahu (10) pre účinnosť elektrolýzy dostávame:

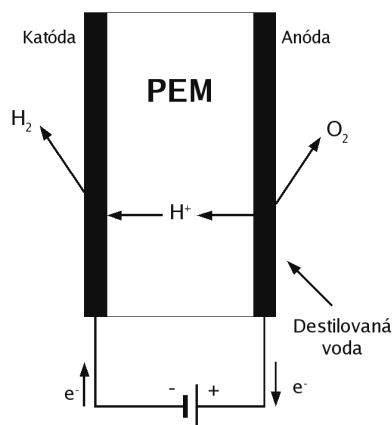
$$\eta_{\text{el}} = \frac{p \cdot V \cdot \Delta H_{298}^{\circ}}{R \cdot T \cdot U \cdot I \cdot \tau} \quad (14)$$

### 3.2. Voltampérová charakteristika PEM elektrolyzéra

Pri experimentálnych skúškach výroby vodíka elektrolyzou vody pomocou elektrickej energie získanej premenou slnečnej energie vo fotovoltaickom panele bol použitý typ elektrolyzéra s tuhú PEM membránou (Proton Exchange Membrane – iónomeničová membrána), ktorá umožňuje priamy prevod prúdu prostredníctvom protónov  $\text{H}^+$  (obr. 8). Veľkou výhodou uvedeného typu elektrolyzéra s membránou je, že pri elektrolýze sa nepoužíva elektrolyt s obsahom hydroxidu draselného, ale čistá voda. Maximálny príkon elektrolyzéra StaXX7 daný výrobcom je 50 W pri 14 V. Maximálna produkcia vodíka je  $230 \text{ ml min}^{-1}$ .

Pred experimentálnymi skúškami výroby vodíka bola nameraná voltampérová charakteristika elektrolyzéra StaXX7, ktorý je tvorený siedmimi anódo-katódovými bipolárne usporiadanými dvojicami elektród. Funkčný povrch elektródy má prierez  $16 \text{ cm}^2$ , čo pri maximálnom prúde 4 A predstavuje prúdovú hustotu  $25 \text{ A dm}^{-2}$ .

Na základe merania voltampérovej charakteristiky elektrolyzéra bolo zistené, že obmedzujúcimi hodnotami pri elektrolýze je napätie 14 V a prúd 4 A, pričom rozsah prevádzkového napätia elektrolyzéra je 10,5 až 14 V. Výroba vodíka elektrolyzou vody pomocou elektrickej energie dodávanej priamo z fotovoltaického panela prebieha pri napätí vyššom ako 10,5 V. Ak je napätie oveľa vyššie ako 10,5 V, spolu s elektrolyzou vody bude nastávať aj uskladnenie prebytočnej elektrickej energie získanej priamo z fotovoltaického panela do akumulátora. V prípade, že napätie je menšie ako 10,5 V, elektrolýza vody môže

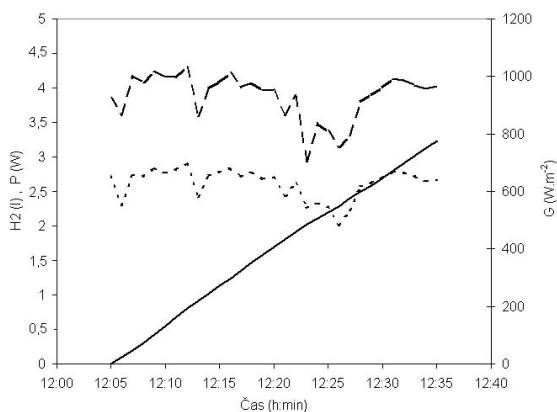


Obr. 8. Schéma elektrolyzéra s tuhú PEM membránou

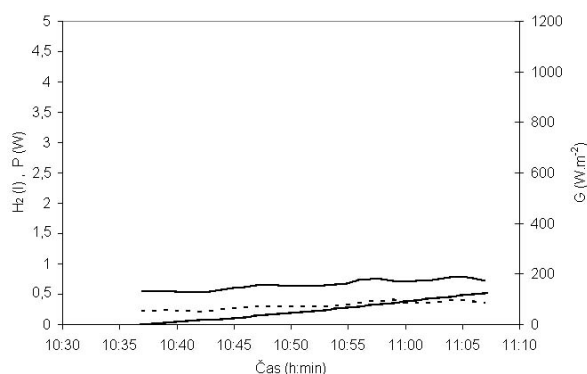
prebiehať len pomocou elektrickej energie dodávanej z akumulátora.

### 3.3. Experimentálne skúšky elektrolýzy vody pri rôznej intenzite slnečného žiarenia

Experimentálne skúšky výroby vodíka elektrolyzou vody pri rôznej intenzite slnečného žiarenia sa uskutočnili len pomocou elektrickej energie dodanej fotovoltaickým panelom, a to počas slnečného dňa 2.7.2007 a dňa 4.7.2007 v čase keď bolo zamračené. V oboch prípadoch sa počas elektrolýzy vody meralo napätie na svorkách elektrolyzéra, elektrický prúd dodávaný fotovoltaickým panelom, intenzita dopadajúceho slnečného žiarenia, množstvo vyrobeného vodíka, tlak a teplota plynu. Pribeh meraní je pre jednotlivé dni znázornený na obr. 9 a 10 ako závislosť množstva vyrobeného vodíka, výkonu fotovoltaického panela a intenzity slnečného žiarenia od času trvania elektrolýzy.



Obr. 9. Množstvo vyrobeného vodíka, výkon fotovoltaického panela a priebeh intenzity slnečného žiarenia počas slnečného dňa 2.7.2007; —  $\text{H}_2$  (l), - - - P (W), - - - - G ( $\text{W m}^{-2}$ )



Obr. 10. Množstvo vyrobeného vodíka, výkon fotovoltaického panela a priebeh intenzity slnečného žiarenia počas zamračeného dňa 4.7.2007; — H<sub>2</sub> (l), - - - P (W), ····· G (W m<sup>-2</sup>)

#### 4. Diskusia

Účinnosť elektrolyzy vody počas slnečného dňa 2.7.2007 a počas zamračeného dňa 4.7.2007 bola vypočítaná podľa vzťahu (14). Vynásobením vzťahu (14) pre účinnosť elektrolyzéra a vzťahu (1) pre účinnosť fotovoltaického panela dostávame celkovú účinnosť  $\eta_{\text{cel}}$  výroby vodíka elektrolyzou vody pomocou elektrickej energie získanej premenou slnečnej energie vo fotovoltaickom paneli na báze hydrogenovaného amorfného kremíka (15):

$$\eta_{\text{cel}} = \eta_{\text{el}} \cdot \eta_{\text{p}} \quad (15)$$

Namerané a vypočítané hodnoty jednotlivých veličín sú sumárne uvedené v tab. II.

Z porovnania nameraných a vypočítaných hodnôt uvedených v tab. II vyplýva, že účinnosť elektrolyzy vody počas zamračeného dňa 4.7.2007 pri priemernej intenzite slnečného žiarenia 163 W m<sup>-2</sup> je vyššia ako účinnosť elek-

Tabuľka II

Vyhodnotenie experimentálnych skúšok výroby vodíka elektrolyzou vody počas jasného a zamračeného dňa

Parameter	Slnečný deň 2.7.2007	Zamračený deň 4.7.2007
$p$ , Pa	98 800	97 900
$U$ , V	13,66	10,74
$T$ , K	297	297
$I$ , A	1,91	0,29
$G$ , W m <sup>-2</sup>	931	163
$\tau$ , min	30	30
Množstvo vyrobeného vodíka pri štandardných podmienkach, ml s <sup>-1</sup>	1,79	0,29
Účinnosť elektrolyzy $\eta_{\text{el}}$ , %	79	91
Celková účinnosť $\eta_{\text{cel}}$ , %	2,8	2,5

trolýzy vody počas slnečného dňa 2.7.2007 pri priemernej intenzite slnečného žiarenia 931 W m<sup>-2</sup>.

Pri elektrolyze vody sa v elektrolyzére časť elektrickej energie mení na teplo  $Q$ , ktoré je definované vzťahom (16):

$$Q = R \cdot I^2 \cdot \tau \quad (16)$$

kde  $R$  je elektrický odpor, pre ktorú platí

$$R = U/I \quad (17)$$

To znamená, že účinnosť elektrolyzy vody pri zamračenej oblohe pri napätí 10,74 V a prúde 0,29 A je vyššia ako je účinnosť elektrolyzy vody pri slnečnej oblohe pri napätí 13,66 V a prúde 1,91 A nakoľko v prvom prípade sa vyvinulo 5606 J tepla, zatiaľ čo v druhom prípade sa vyvinulo až 46 963 J tepla. Celková účinnosť výroby vodíka elektrolyzou vody pomocou elektrickej energie získanej z fotovoltaického panela pri vyššej intenzite slnečného žiarenia 931 W m<sup>-2</sup> bola vyššia ako pri zamračenej oblohe, keď intenzita slnečného žiarenia bola 163 W m<sup>-2</sup>. Pri vyššej intenzite slnečného žiarenia sa vyrobilo 1,79 ml s<sup>-1</sup> vodíka, zatiaľ čo pri nižšej intenzite slnečného žiarenia sa vyrobilo len 0,29 ml s<sup>-1</sup> vodíka.

#### 5. Záver

Energetické zdroje, ktoré má ľudstvo k dispozícii, a ktorými pokrýva svoje energetické potreby môžeme v súčasnosti považovať za veľmi početné a relatívne aj bohaté. Aj napriek tomu, že uhlie ako energetický zdroj sa významnou mierou podieľa na znečisťovaní životného prostredia, hrá dôležitú úlohu v súčasnosti pri výrobe elektrickej energie. Technický rozvoj sítě umožnil zredukovať emisie oxidov sýry a dusíka, ale neexistuje podobné riešenie pre oxid uhličitý, ktorý sa významnou mierou podieľa na zvýšenom skleníkovom efekte. Zemný plyn a ropa predstavujú o to cennejšie zdroje energie, že sú ľahšie transportovateľné a v prípade zemného plynu je jeho energetické využívanie ekologickejšie ako pri používaní uhlia.

Vzhľadom na to, že zásoby fosílnych palív sa postupne vyčerpávajú a v dôsledku nárastu ľudskej populácie je možné predpokladať, že spotreba energie bude neustále rásť, vynakladá sa v súčasnosti značné úsilie na hľadanie nových alternatívnych palív. Tieto alternatívne palivá by mali byť adekvátnou náhradou fosílnych palív z hľadiska energetického obsahu, s minimálnym negatívnym vplyvom na životné prostredie, a pritom ich zásoby by nemali byť obmedzené. Medzi takéto energetické zdroje zaraďujeme primárne a sekundárne zdroje energie.

Veľmi výhodnou kombináciou je uskladniť získanú energiu z obnoviteľných zdrojov vo forme vodíka. Technológiu vodíkovej energetiky možno jednoducho aplikovať napr. v domoch a komerčných budovách s využitím fotovoltaických strešných panelov. Vodík sa môže skladovať na neskoršie použitie v palivových článkoch alebo sa môže prepravovať do podzemných zásobníkov pomocou existujúcej plynovej distribučnej siete.

Vstupné náklady na zariadenie pre výrobu vodíka sú

vysoké, pretože je potrebné aplikovať špeciálne komponenty a zaviesť nové technológie. Ale na druhej strane prevádzkové náklady sú minimálne. Investičné náklady by mohli klesať s počtom inštalovaných systémov. Očakáva sa, že vodík vyrábaný zo slnečnej energie bude môcť konkurovať s ropou, a to hlavne vtedy, ak budú zohľadnené environmentálne aspekty a nestabilita spojená s dodávkou ropy.

#### LITERATÚRA

1. Klenovčanová A., Imriš I.: *Zdroje a premeny energie*. ManaCon, Prešov 2006.
2. Fahrenbruch A. L., Bube R. H.: *Fundamentals of Solar Cells, Photovoltaic Solar Energy Conversion*. Academic Press, New York 1983.
3. Cihelka J.: *Solární tepelná technika*. Nakladatelství T. Malina, Praha 1994.
4. Komorová E., Imriš I.: *Termodynamika v hutnictve*. Alfa, Bratislava 1991.
5. Lebbal M., Zhao T., François B, Lecoeuche S.: *II. Proceedings of International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2007: Dynamic electric modelling of electrolyser and hydrogen production regulation, Istanbul, Turkey, 13-15 July 2007*, str. 1.
6. Peavey M. A.: *Fuel from water*, Energy Independence with Hydrogen, Merit, Inc., Louisville 2003.

**A. Klenovčanová, T. Brestovič, and I. Imriš**  
(*Department of Energy Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University, Košice, Slovak Republic*): **Hydrogen Production by Water Electrolysis Using Photovoltaic Solar Module**

Fossil fuels as energy sources, in particular oil and natural gas, are running out. Another problem associated with their use is the carbon dioxide production. To avoid the problems the methods of using and producing energy must be changed. Attention is currently devoted to production of hydrogen by water electrolysis in electrolyzers with proton-exchange membranes. The required electric energy is obtained from solar photovoltaic modules with amorphous silicon. The efficiency of the electrolysis and total recovery of hydrogen production have been calculated. The hydrogen thus obtained can be directly used for heat production by combustion or via fuel cells for electricity and heat production.