

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Optimalizace inicializační sekvence PEM palivového
článku**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal ŠANTA**
Osobní číslo: **E13B0338P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Optimalizace inicializační sekvence PEM palivového článku**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte rešerši na téma provozu PEM článků a vlivu termodynamických veličin na jejich provoz. Zahrňte do rešerše i starší diplomové práce na podobné téma.
2. Sestavte přehledný seznam významných parametrů ovlivňujících nájezd palivového článku StaXX a proveďte jejich význam a možnosti jejich optimalizace.
3. Zaměřte se při testování nájezdových parametrů systému StaXX na časový horizont předešlé odstavky systému při testech nájezdu do provozu.
4. Vyhodnoťte význam časového hlediska pro jednotlivé parametry a zaměřte se zejména na hydrataci PEM, dodávku paliva, jeho objem a stabilitu a vliv oxidovadla.
5. Vytvořte na základě provedených sad experimentů optimální startovací sekvenci pro článek StaXX a popište význam jednotlivých vlivů v přehledné tabulce.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

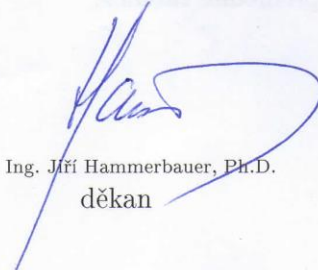
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

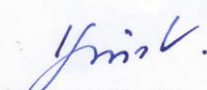
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Štekl, Ph.D.**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá PEM články a optimalizací jejich iniciační sekvence. Práce obsahuje stručnou historii článků, jejich druhy, bližší popis funkce PEM článku a jeho částí. Následně je podrobněji popsán článek, který je zkoumán v tomto experimentu. Jsou zde stanoveny faktory ovlivňující chod a především náběh článku. Tyto faktory jsou dále ověřeny měřeními závislosti doby náběhu na předešlé odstávce a dalších termodynamických parametrech. Výsledky jsou zhodnoceny a v závislosti na nich je sestaven návrh optimální iniciační sekvence PEM článku.

Klíčová slova

Palivový článek, palivový článek s polymerním elektrolytem, PEM palivový článek, PEMFC, faktory ovlivňující náběh vodíkového palivového článku, iniciační sekvence, optimalizace iniciační sekvence

Abstract

This bachelor thesis deals with the hydrogen PEM fuel cells and with the optimization of their initial sequence. The thesis contains a brief history of fuel cells in general, types of fuel cells and detailed description of basic functional principles and structure of the PEM fuel cell. Subsequently the particular PEM fuel cell which is examined in this experiment is also thoroughly described. Factors which affect the functionality and especially the starting sequence are stated. After that, these factors are confirmed by measuring the dependence of the starting sequence time on previous inactive time period and other thermo dynamical parameters. The results are subsequently evaluated and with respect to them, the optimal initial sequence design is drawn up.

Key words

Fuel cell, proton exchange membrane fuel cell, PEM fuel cell, PEMFC, factors affecting the initiation of hydrogen fuel cell, initiation sequence, optimization of initiation sequence

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2017

Michal Šanta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat především svým rodičům za veškerou podporu během studia. Také děkuji Ing. Pavlu Šteklovi, Ph.D. za odborné vedení této práce, pomoc při praktickém měření a za rady, které mi poskytnul pro realizaci této práce.

Obsah

OBSAH	6
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1. HISTORIE	10
2. DRUHY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	13
2.1 ČLÁNEK S TUHÝM POLYMERNÍM ELEKTROLYTEM - PEMFC	13
2.2 ČLÁNEK S ALKALICKÝM ELEKTROLYTEM - AFC	13
2.3 PŘÍMÝ METANOLOVÝ ČLÁNEK - DMFC	14
3. ČLÁNEK S POLYMERNÍ MEMBRÁNOU PEM	15
3.1 PRINCIP PŘEMĚNY ENERGIE	15
3.1 KOMPONENTY PALIVOVÉHO ČLÁNKU	16
3.1.1 Polymerní membrána	16
3.1.2 Struktura elektrod	17
3.1.3 Bipolární desky	18
3.2 ZÍSKÁVÁNÍ VODÍKU	19
3.2.1 Parní reforming zemního plynu	20
3.2.2 Elektrolýza	20
3.2.3 Cena vodíku	21
4. ČLÁNEK STAXX	22
4.1 DUPONT FIRMA VYRÁBĚJÍCÍ MEMBRÁNU NAFION®	22
4.2 FIRMA H-TEC VYRÁBĚJÍCÍ ČLÁNEK STAXX	23
4.3 POPIS MĚŘENÉHO ČLÁNKU STAXX	24
4.4 POPIS MĚŘICÍHO PROSTŘEDÍ LABVIEW	28
5. PROVOZ A NÁBĚH PEM ČLÁNKU	29
5.1 PARAMETRY SOUVISEJÍCÍ S ÚČINNOSTÍ ČLÁNKU.....	29
5.1.1 Gibbsova volná energie	29
5.1.2 Ztráty v zatíženém palivovém článku	29
5.2 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ PROVOZ PALIVOVÉHO ČLÁNKU.....	31
5.2.1 Vliv provozní teploty	31
5.2.2 Vliv provozního tlaku	32
5.2.3 Vliv složení a koncentrace paliva	32
5.2.4 Vliv životnosti článku	32
5.2.5 Vliv hydratace membrány	33
5.2.6 Vliv proudové hustoty	33
5.3 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ NÁBĚH PALIVOVÉHO ČLÁNKU A JEJICH OPTIMALIZACE	34
5.3.1 Saturace membrány vodou	34
5.3.2 Dodávka paliva	34
5.3.3 Doba předchozí odstávky	34
5.3.4 Další parametry	35
6. MĚŘENÍ ČASOVÉ ZÁVISLOSTI NÁBĚHOVÉ FÁZE PO PŘEDEŠLÉ Odstávce	36
6.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	36
6.2 POSTUP MĚŘENÍ	37
6.2.1 Doplnění provozních kapalin a spuštění PC	37
6.2.2 Odečet parametrů v místnosti	37
6.2.3 Sepnutí zdroje vodíku	38
6.2.4 Hydratace PEM článků	38
6.2.5 Připojení zátěže	39

6.2.6	Náběh článku.....	41
6.2.7	Provozní stav článku.....	42
6.2.8	Odstávka článku.....	42
6.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	42
6.4	VLIV ČASOVÉHO HLEDISKA NA JEDNOTLIVÉ PARAMETRY.....	43
6.5	NÁVRH OPTIMÁLNÍ STARTOVACÍ SEKVENCE PEM PALIVOVÉHO ČLÁNKU.....	44
6.5.1	Sepnutí zdroje vodíku.....	44
6.5.2	Zavodnění a náběh naprázdno.....	44
6.5.3	Připojení zátěže a případná relaxace.....	44
6.5.4	Provoz.....	44
6.5.5	Odstávka.....	45
7.	ZÁVĚR.....	46
	ZDROJE.....	47
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	48
	SEZNAM TABULEK.....	48
	SEZNAM GRAFŮ.....	48

Úvod

Úvodem této práce je stručná historie, seznámení s různými druhy palivových článků a poté je pozornost věnována především palivovému článku s polymerní membránou. Ten je v dnešní době jedním z nejdiskutovanějších alternativních zdrojů elektrické energie budoucnosti. Jeho konstrukční jednoduchost, příznivé rozměry a účinnost jsou lákavými aspekty zejména pro mobilní aplikace a pro automotive průmysl. Co je ovšem méně lákavé, je jeho pořizovací cena, která je díky používaným materiálům stále dosti vysoká.

V dalších kapitolách je blíže rozebrán princip přeměny energie, konstrukce a provedení jednotlivých komponentů článku a metody získávání vodíku.

Pro palivový článek s polymerní membránou je značně nevýhodná odstávka, proto se stala předmětem zkoumání této práce. Cílem je otestovat doby náběhových fází v závislosti na předchozí době odstávky laboratorního článku od firmy H-Tec, model STAXX Exhibition 3050 a diskuse parametrů mající vliv na jeho náběh. Součástí je popis jednotlivých částí měřené soustavy a také použitých zařízení a přístrojů. Dále jsou uvedeny výsledky měření. Závěr tvoří návrh optimální startovací sekvence.

Seznam symbolů a zkratk

A/D	Analogo-digitální
AFC	Alkaline Fuel Cell Palivový článek s alkalickým elektrolytem
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell Metanolový palivový článek
e ⁻	záporně nabitá částice, elektron
GDL	Gas Diffusion Layer difuzní vrstva elektrod
GVE	Gibbsova volná energie
H ⁺	kladně nabitá částice vodíku, kationt vodíku
MEA	Membrane Electrode Assembly sestava membrány a elektrod
PEM	Proton Exchange Membrane, Polymer Electrolyte Membrane Polymerní membrána, tuhý polymerní elektrolyt
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell Palivový článek s tuhým polymerním elektrolytem
PTFE	chemická sloučenina polytetrafluorethylen, známá jako Teflon [®]
Pt	Platina

1. Historie

I když se může zdát, že tato revoluční technologie je výtvorem nedávné minulosti, není tomu tak. Již v roce 1800 William Nicholson a Sir Anthony Carlisle objevili účinky průchodu stejnosměrného proudu kapalinou a tento jev, při kterém lze rozložit vodu na plynný vodík a kyslík, později nazvali elektrolýzou. V roce 1939 švýcarský vědec Christian Friedrich Schönbein publikoval svou studii o reakci vodíku a kyslíku s katalyzátorem v podobě platiny. Ve stejném roce britský soudce, vědec a vynálezce Sir William Robert Grove započal svůj výzkum na stejné téma a je považován za objevitele principu palivového článku. Když při jednom z experimentů, kdy zkoumal elektrolýzu vody, zpozoroval, že po odpojení zdroje od elektrolyzéry mezi jeho svorkami protéká proud opačným směrem. A jde tak o opačný jev k elektrolýze, při kterém dochází ke spotřebě vyprodukovaného vodíku a kyslíku. Tento článek pojmenoval plynová baterie. Ale protože se v té době masivně vyvíjely spalovací a elektrické motory, tak své uplatnění v tu dobu nenašel.

Roku 1886 byl ve Francii zkonstruován vůbec první elektromobil, k jehož pohonu bylo použito právě těchto článků. A i když se jednalo opravdu o ojedinělý projekt, na tu dobu možná až příliš, upustilo se od něj a další vývoj se na nějakou dobu pozastavil.

Pojem „palivový článek“ se s největší pravděpodobností prvně objevuje roku 1889, kdy jej použili německý chemik a průmyslník Ludwig Mond a jeho anglický pomocník, také chemik, Charles Langer. Tito dva pánové se pokoušeli sestavit článek, který by pracoval se vzduchem a svítíplynem. Byl však příliš drahý a tak se neuplatnil.

Během zbytku 19. a začátkem 20. století se vědci pokoušeli o vývoj nových palivových článků při kombinování různých paliv a elektrolytů, ovšem bezvýsledně. Teprve až roku 1932 britský vědec Dr. Francis Thomas Bacon sestavil první funkční prototyp článku s niklovými elektrodami, který využíval jako palivo plynný vodík a kyslík. Kyselý elektrolyt v podobě kyseliny sírové nahradil zásaditým hydroxidem sodným (KOH), ten měl stejnou funkci, ale bez korozivních účinků na elektrody.



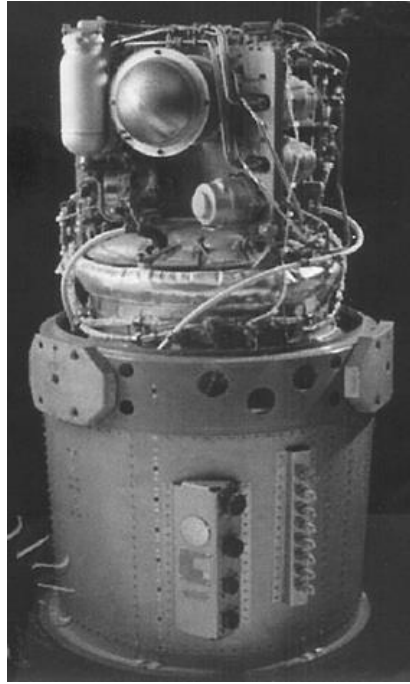
Obrázek 1: Dr. Francis Thomas Bacon

Následujících dvacet let Dr. Bacon testoval a vylepšoval své články, až roku 1952 se svým týmem zkonstruovali 6 kW systém článků.



Obrázek 2: Dr. Bacon s 6kW článkem

Praktického využití se články dočkaly až kolem roku 1960, kdy NASA hledala alternativní zdroje elektrické energie pro své kosmické lety Gemini a Apollo. Jaderná energie byla tehdy stále příliš nebezpečná, klasické baterie příliš těžké a solární panely příliš velké a neskladné, byly palivové články nejlepším řešením. Články pracující na bázi Baconova konceptu byly vyrobeny firmou Pratt and Whitney Aircraft. Využívaly čistý vodík, palivo raketoplánu, a kyslík, vedlejším produktem byla voda, která se využila pro vodní hospodářství vesmírného modulu. Byly jimi vybaveny vesmírné lodě programu Apollo a Gemini. Modul Apollo nesl 3 tyto palivové jednotky, každá z nich byla složena z 31 sériově spojených elementárních palivových článků o výkonu 7kW.



Obrázek 3: Systém palivových článků letu Apollo

Po tomto rozmachu ve vesmírném inženýrství články získaly publicitu, byly označeny za energetický zdroj budoucnosti, a začal být o jejich výzkum veliký zájem. Zatímco ve vesmírném vývoji nehrála cena až tak velkou roli, pro moderní komerční aplikace je tomu naopak. Za dobu jejich vývoje došlo k velkému pokroku především mezi materiály a to zejména na snížení podílu drahé platiny jako katalyzátoru. Ale i tak jsou stále velmi drahé pro uplatnění v běžné komerční sféře, ať už v elektromobilech, nebo jiných mobilních aplikacích. [1]

2. Druhy palivových článků

Dělí se především podle druhu použitého elektrolytu, ten pak určuje jejich vlastnosti. Dále například podle toho s jakými provozními teplotami pracují, podle použitého paliva a katalyzátoru. Zde zmíníme několik článků nejvíce využívaných pro moderní aplikace.

2.1 Článek s tuhým polymerním elektrolytem - PEMFC

Jako elektrolyt je použita polymerní membrána kyselého charakteru s protonovou vodivostí. Palivem pro tyto články je plynný vodík. Elektrody jsou porézní uhlíkové s katalyzátorem v podobě tenké vrstvy platiny Platinový katalyzátor je náchylný na obsah oxidu uhelnatého (CO) v palivu, proto je dobré jej zajistit co nejčistší. Teplotní rozsah u tohoto typu je velmi příznivý, většinou se pohybuje v teplotách pod 100°C a tak má větší životnost a nejsou kladeny tak velké nároky na použité materiály. Start článku je velmi rychlý. Při používání v teplotách nad 100° C dochází k vysychání membrány a snížení životnosti. Účinnost se pohybuje okolo 60%. Jeho provoz je, díky nízké teplotě, tlaku a pevnému elektrolytu, relativně bezpečný. Nevýhodou je jeho vysoká cena, zejména díky drahé platině a polymerní membráně. I přes to se jedná zejména díky jeho dobrým vlastnostem a rozměrům o komerčně nejvíce využívaný článek, především pro mobilní aplikace. V poslední době se o něm čím dál více hovoří, jako o budoucím zdroji elektromobilů v automobilovém průmyslu. [1][2][3]

2.2 Článek s alkalickým elektrolytem - AFC

Jako elektrolyt nejčastěji využívají roztok hydroxidu draselného (KOH) s vysokou viskozitou, jedná se o alkalický hydroxid s nejvyšší vodivostí a umožňuje elektronovou vodivost. Může být volně přítomný mezi elektrodami, nebo napuštěn například v azbestové matici. Jako palivo je využíván opět čistý vodík. Výhodou těchto článků je, že nevyžadují aplikaci drahé platiny jako katalyzátoru, ta může být nahrazena levnějšími kovy, jako je nikl (Ni), nebo stříbro (Ag). Naopak nevýhodou je, že tento typ je náchylný na přítomnost CO, nebo CO₂ v palivu a okysličovadlu, to způsobuje reakci s hydroxidem draselným a vzniká uhličitán draselný (K₂CO₃), který následně způsobuje degradaci elektrolytu a zanášení pórů elektrod krystaly a tím se rapidně snižuje účinnost a životnost

článku. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 80°C – 250°C a to podle koncentrace hydroxidu draselného. Účinnost je cca 60%. Díky vysokým nárokům na čistotu vodíku a kyslíku je využíván pro vesmírné a vojenské aplikace, kde cena nehraje tak významnou roli. [1][2][3]

2.3 Přímý metanolový článek - DMFC

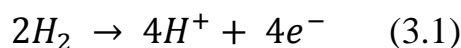
Struktura a funkce je obdobná jako u PEM článku, s tím rozdílem, že jako palivo využívá kapalný metanol. Ten se v porovnání s plynným vodíkem podstatně lépe skladuje. Oxidace metanolu je ovšem pomalejší a to se projeví nižším svorkovým napětím. Jedná se také o nízkoteplotní článek pracující v rozmezí teplot 20°C – 130°C. Elektrická účinnost je cca 40%. Jejich využití je u aplikací s nižším požadovaným výkonem, například pro přenosnou elektroniku. [1]

3. Článek s polymerní membránou PEM

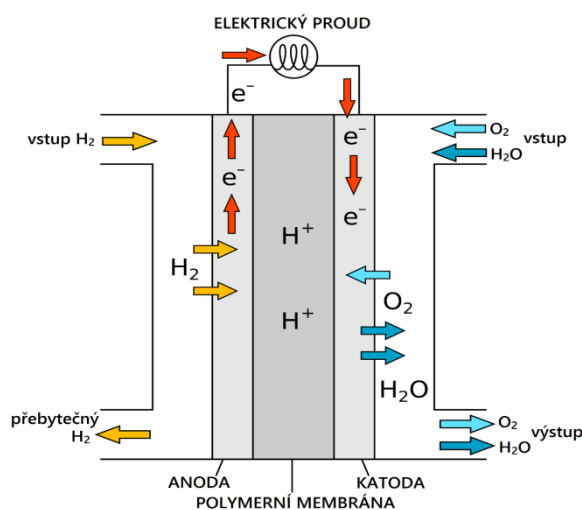
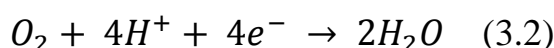
Tyto články jsou označovány zkratkou PEM ta je odvozena z anglického Proton Exchange Membrane nebo také Polymer Electrolyte Membrane. Velmi efektivně využívají chemické energie vodíku k přeměně na elektrickou energii. Díky vysoké výkonové hustotě při zachování příznivých rozměrů jsou atraktivním zdrojem pro mobilní aplikace a automobilový průmysl. Jedná se o nízkoteplotní články s provozní teplotou do 90°C, což je příznivé jak pro dynamické vlastnosti, tak i pro životnost článku vzhledem k použitým materiálům.

3.1 Princip přeměny energie

Vodík je přiváděn na anodu, kde se díky katalytickým látkám rozkládá, neboli oxiduje a dochází ke vzniku kationtů vodíku H^+ a elektronů e^- .



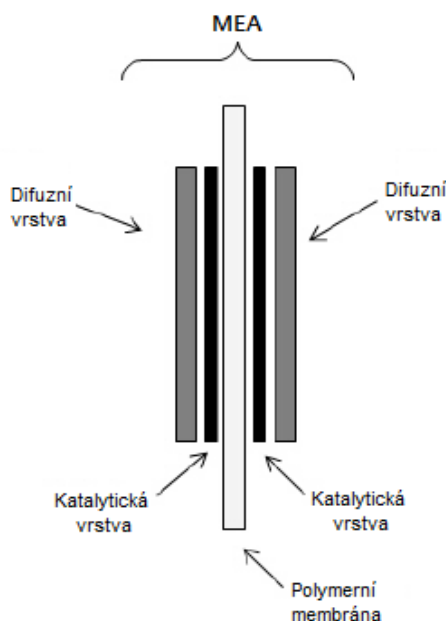
Elektrony jsou sbírány a odváděny vnějším obvodem, přes zátěž, kde konají elektrickou práci na katodu, zatímco kationty vodíku procházejí ve stejném směru skrze elektrolyt. A na katodě poté díky oksyličovadlu v podobě kyslíku vzájemně rekombinují a výsledný produkt z této reakce je voda, která zároveň udržuje stálou teplotu článku. [1]



Obrázek 4: Princip funkce článku PEM

3.1 Komponenty palivového článku

Základem těchto článků je elektrolyt v podobě polymerní membrány a na ní přiléhajících elektrod. Takováto sestava se označuje MEA (Membrane Electrode Assembly). Pak jsou zde další díly, jako bipolární desky aj.



Obrázek 5: MEA- základní struktura článků PEM

Existují také články, které mají několik těchto struktur poskládaných za sebou, dle potřebného výkonu, ten závisí na ploše membrány. Označují se jako stack, nebo také jako sendvičová, či skládaná struktura.

3.1.1 Polymerní membrána

Jde o tuhý polymerní elektrolyt, který odděluje elektrody mezi sebou a zamezuje průchodu reaktantů a vedlejších produktů mezi anodovou částí (vodík) a katodovou částí (vzduch a voda). Tato membrána disponuje iontovou vodivostí určitého druhu. Toho se docílí pomocí charakteru membrány, buď to může být zásaditý propouštějící záporně nabitě ionty, nebo kyselý propouštějící pouze kladně nabitě ionty. Pro tento článek se používá vysoce kyselý charakter propouštějící jen kladné ionty vodíku H^+ , tzv. katexová membrána, ty se pohybují společně s molekulami vody, proto musí být vstupní plyn zvlhčován. Nejrozšířenějšími membránami pro tuto aplikaci jsou membrány Nafion[®] firmy DuPont z chemicky stabilizované perfluorosulfonové kyseliny. Základem této kyseliny je polytetrafluorethylen (dále jen PTFE), neboli Teflon[®], který tvoří pevnou strukturu

elektrolytu, disponuje chemickou odolností a hydrofobními vlastnostmi, které zajišťují dobrý odvod vyprodukované vody a zamezující nadměrnému hydratování membrány. S tímto základem je spojen řetězec kyseliny sulfonové tvořené uhlovodíkovým řetězcem zakončeným iontovým klastrem. Klastry tvoří shluky se silně hydrofilním okolím v jinak hydrofobním prostředí PTFE a tak je membrána schopna zadržet vodu. Pokud je dostatečně, ne však příliš hydratována, kationty vodíku mohou skrze ní procházet, a může probíhat reakce. [1] [3]

3.1.2 Struktura elektrod

Máme zde anodovou elektrodu, na které probíhá oxidace paliva a katodovou elektrodu, kde probíhá redukce na vedlejší produkty, mezi nimi se nachází polymerní membrána. Tyto elektrody mají dvě základní vrstvy katalytickou a difuzní.

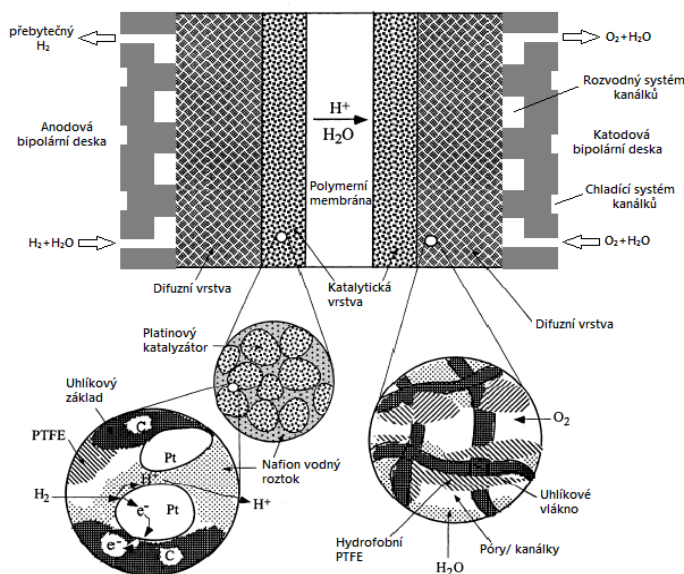
Difuzní vrstva elektrod

Tato vrstva bývá někdy označována zkratkou GDL (Gas Diffusion Layer). Důležitou funkcí této vrstvy je zajistit dobrý přísun reaktantů pro reakci v katalytické vrstvě anody a katody, také je žádoucí, aby měla dobrou tepelnou a elektronovou vodivost. Proto jsou pro tuto vrstvu využívána uhlíková vlákna, nejčastěji v podobě tkaniny, nebo papíru. Další funkcí této vrstvy je udržení optimálních hydratačních podmínek pro polymerní membránu a zajistit co nejlepší odvod vyprodukované vody na katodě. Proto, aby tyto vlastnosti byly co nejlepší, se na uhlíková vlákna nanáší hydrofobní materiál v podobě již zmíněného PTFE. Difuzní vrstva je zároveň také nosnou pro vrstvu katalytickou. [1] [3]

Katalytická vrstva elektrod

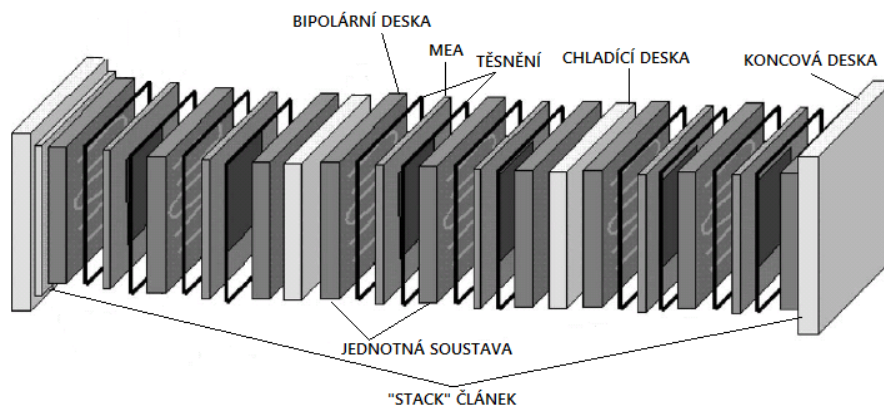
Právě v této vrstvě dochází k elektrochemickým reakcím. Na anodě k oxidaci vodíku a rozkladu na protony a elektrony, poté naopak na katodě k rekombinaci protonů vodíku s kyslíkem za vzniku vody a tepla. Plocha, se kterou reaktanty přicházejí do styku je zásadní pro efektivitu reakce, proto se na uhlíkový základ (difuzní vrstvu) nanášou kovy, nebo slitiny kovů, které vytvářejí jádra. Na tuto strukturu je nanesený tenký film katalyzátoru v podobě chemicky odolné a stabilní platiny (Pt), ta se váže na molekuly vodíku a kyslíku a zrychluje jejich reakce. U takto vytvořené katalytické vrstvy nejsou takové nároky na množství drahé platiny a navíc dosahuje lepších katalytických vlastností, než samotná platina. [1] [3]

3.1.3 Bipolární desky

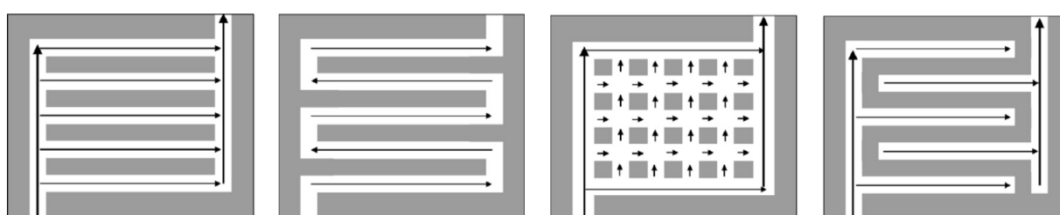


Obrázek 6: Detail na struktury jednotlivých vrstev

Tyto desky slouží ke kontinuálnímu přívodu paliva a oxidantu do struktury elektrod a odvodu vyprodukované vody po rekombinaci na katodě. Dále také jako nosník pro proudové sběrací elektrody, sloužící k propojení MEA struktury a výstupních svorek článků, na kterých se po připojení zátěže uzavírá elektrický obvod (vodivé spojení anody s katodou). Desky se sběracími elektrodami ohraničují jednotlivé složení MEA (anoda + membrána + katoda). Desky výukového systému StaXX jsou realizovány z transparentního průhledného metakrylátu a tak je dobře vidět vnitřní struktura článků. V reálných aplikacích články mohou mít i více těchto struktur seřazených sériově za sebou, pokud je žádoucí vyšší výkon článku, v tomto případě se jedná o tzv. „stack“ články a desky, vyrobeny z dobře tepelně a elektricky vodivých materiálů, přímo propojují jednotlivé sousední sestavy a celkový výkon je odebrán z elektrod krajních desek článku. U těchto aplikací je od bipolárních desek žádoucí, aby byly dobře elektricky a tepelně vodivé a dosahovaly určité mechanické a chemické odolnosti. Proto se nejčastěji vyrábějí z grafitu (uhlíku), ten má kromě těchto vlastností dobrý přechodový odpor, díky kterému nedochází k takovým ztrátám. Je dobře obrobitelný, což je přínosné při vytváření rozvodných (distribučních) i chladicích kanálků. Geometrické uspořádání těchto kanálků značně ovlivňuje funkčnost článku, existuje mnoho druhů provedení, zde si ukážeme jen některé příklady. [1] [3]



Obrázek 7: „stack“ článek složený z několika jednotlivých struktur



Obrázek 8: Ukázka některých geometrických provedení distribučních kanálků

3.2 Získávání vodíku

Co neodmyslitelně patří k palivovým článkům PEM je palivo v podobě vodíku. Dá se říci, že se jedná zatím o jeden z největších problémů v tomto směru. A to zejména proto, že většina vodíku se získává z reformingu fosilních paliv, jedná se o tak zvanou: „energii budoucnosti“, kdy už třeba žádná z těchto surovin nebude dostupná. Existují i další technologie výroby vodíku, které ovšem nemají takové zastoupení a snad se v budoucnosti dočkají vyšší pozornosti a rozvoje. Zde bude nastíněno několik v současnosti nejrozšířenějších metod výroby.



Obrázek 9: Graf podílu výroby vodíku [4]

3.2.1 Parní reforming zemního plynu

Výroba touto technologií je nejlevnější a v současnosti nejrozšířenějším způsobem průmyslové výroby vodíku. Teplo potřebné pro tento reformní cyklus i následnou konverzi oxidu uhelnatého (CO) je dodáváno z přímého spalování části vstupujícího zemního plynu. Proces se skládá ze dvou fází. V první fázi se do reforméru, kde se nachází vodní pára o teplotě 500°C - 950°C a tlaku 0,3 MPa - 2,5 MPa za přítomnosti katalyzátoru přivádí metan (CH₄). Ten je dominantní složkou zemního plynu. Následně tato směs chemických látek vzájemně reaguje za vzniku vodíku, oxidu uhelnatého a menšího podílu oxidu uhličitého. Další fází je pak navýšení vyprodukovaného vodíku tzv. konverzí oxidu uhelnatého z reforméru s přidanou párou, tato reakce již probíhá za nižších teplot. Účinnost tohoto procesu je závislá na poměru páry a uhlíku ve směsi, pohybuje se přibližně kolem 80%. Nevýhodou je současná produkce oxidu uhličitého, na jedno kilo vodíku se vyprodukuje přibližně sedm kilogramů tohoto nežádoucího plynu. Takto vyprodukovaný vodík je levný, ale nedosahuje příliš velké čistoty, pro použití v palivových článcích je nutné jej dočistit a tím roste i cena. [4]

3.2.2 Elektrolýza

Technologie výroby vodíku rozkladem vody se v současné době jeví jako nejslibnější metoda, především díky vysoké efektivitě, velké intenzitě a jednoduchosti v porovnání s ostatními.

Existují tři základní druhy elektrolýzy, nízkoteplotní alkalická elektrolýza se zásaditým kapalným elektrolytem, vysokoteplotní elektrolýza a kyselá elektrolýza s polymerním membránovým elektrolytem.

Zde bude podrobněji zmíněn poslední jmenovaný typ elektrolýzy neboli PEM elektrolýza. Touto variantou disponuje námi měřený PEM článek, jedná se o reverzní děj k PEM palivovému článku. V tomto ději dochází vlivem průchodu stejnosměrného proudu vodným roztokem ke štěpení vazeb vodíku a kyslíku. Vodík následně reaguje na katodě a uvolňuje se v plynné podobě, což je žádoucí, poté je jímán a skladován, nebo přímo využíván. Elektrolýza nevyžaduje žádný přídavný zdroj tepla, probíhá při normálních pokojových teplotách, k reakci je zapotřebí pouze zdroj elektrické energie. Ideálním napětím pro reakci je 1,22 V, ale reálně se pohybuje v rozmezí 1,85 V - 2,05 V, kdy je nutné přivádět část tepla v podobě elektrické energie.

Účinnost se pohybuje okolo 80 % - 92 %, bez ohledu na účinnost výroby vstupní energie. Pokud zahrneme do účinnosti i účinnost výroby vstupní elektrické energie, celkově se pohybuje v rozmezí 25 % - 35 %. Výstupem je kyslík a vysoce čistý plyný vodík, který pro většinu aplikací dostačuje bez nutnosti dalšího čištění.

Tato výroba se vyplatí tam, kde je levná výroba elektrické energie a dostatek vody. Výhodou je možnost použití různých zdrojů elektrické energie, z nichž jsou nejzajímavější zejména ekologické zdroje jako vodní, solární a větrné elektrárny. A také flexibilita, díky nenáročnosti procesu a dobrým rozměrům se využívá pro mobilní aplikace. Nevýhodou je vysoká cena zejména díky použitému platinovému katalyzátoru a polymerní membráně.

[4]

3.2.3 Cena vodíku

Cenu ovlivňuje především čistota vodíku. Určujícím faktorem pro čistotu vodíku je aplikace, ve které je vodík používán. Pro naši aplikaci bylo zapotřebí využít vodíku s nejvyšší čistotou, někdy se také udává chemický pojem - pro laboratorní účely. Na čistotu vodíku je náchylný především platinový katalyzátor. Plyn se prodává převážně v 50l láhvích s tlakem 200 bar. Zde bude uvedena pro představu cena plynu o jiné čistotě. Vodík s čistotou 3.5, to znamená s procentuální čistotou 99,95 % (3 označuje počet devítek a 5 poté polovinu na setinném místě), se pohybuje kolem ceny 3000 Kč za láhev, vodík od firmy Linde Gas, a.s. pro laboratorní účely s čistotou 6.0 (99,9999 %) se pohybuje kolem ceny 6000 Kč. Zde vidíme, že přibližně pro řádově dvojnásobnou čistotu plynu platí přímá úměra dvojnásobného nárůstu ceny.

4. Článek StaXX

Jde o proměřovaný článek v elektrochemické laboratoři. V následujících kapitolách se seznámíme s firmou DuPont produkující polymerní membránu, kterou článek využívá, dále s firmou H-Tec a s měřeným článkem, který tato firma vyrobila, na závěr bude zmíněno měřicí prostředí LabVIEW.

4.1 DuPont firma vyrábějící membránu Nafion®



Obrázek 10: Logo firmy DuPont

Americká společnost DuPont je jedním z největších světových koncernů v oblasti chemické výroby zabývající se zejména výrobou a zpracováním polymerů. Byla založena roku 1802 Irénem du Pontem jako malá továrna na výrobu trhavin. V dnešní době má široké zastoupení na trhu, věnuje se potravinářství, elektronice, vyrábí barvy, plasty a mnoho dalšího. Celosvětově zaměstnává okolo 60 000 zaměstnanců a v roce 2006 měla obrat 29 miliard dolarů. Po světě se proslavila především díky patentům na moderní materiály jako Nylon, Teflon, Lycra nebo Kevlar.

Pro nás je tato firma zajímavá především proto, že vyrábí polymerní membránu Nafion®, ta byla objevena již roku 1960 Walterem Grotem. Tyto membrány se využívají především ve vodíkových palivových člancích, včetně námi měřeného laboratorního článku StaXX. Membrány slouží jako elektrolyt pro oddělení anodové a katodové části elektrod a vedlejších produktů. Disponuje tzv. protonovou vodivostí, to znamená, že separuje ionty vodíku a skrze svou strukturu propouští pouze kladné ionty, jak již bylo zmíněno dříve v kapitole 3.2.1 Polymerní membrána na straně 16.

4.2 Firma H-Tec vyrábějící článek STAXX



Obrázek 11: Fotografie loga firmy H-Tec na měřeném článku

Tato firma se dělí do dvou divizí pracujících pod společností GP JOULE se sídlem v Luebecku v Německu.

H-Tec Systems zabývající se především vývojem a produkcí PEM elektrolyzérů pro komerční účely a využití v reálném prostředí. Hlavním cílem je co možná nejlevněji akumulovat elektrickou energii do vodíku a to především pomocí obnovitelných zdrojů, větrných a solárních elektráren, následně ji uskladnit a využít, kde je potřeba. Energie z vodíku nemusí být nutně využívána jen v energetice, ale také jako zdroj pro mobilitu, vytápěcí účely a další.

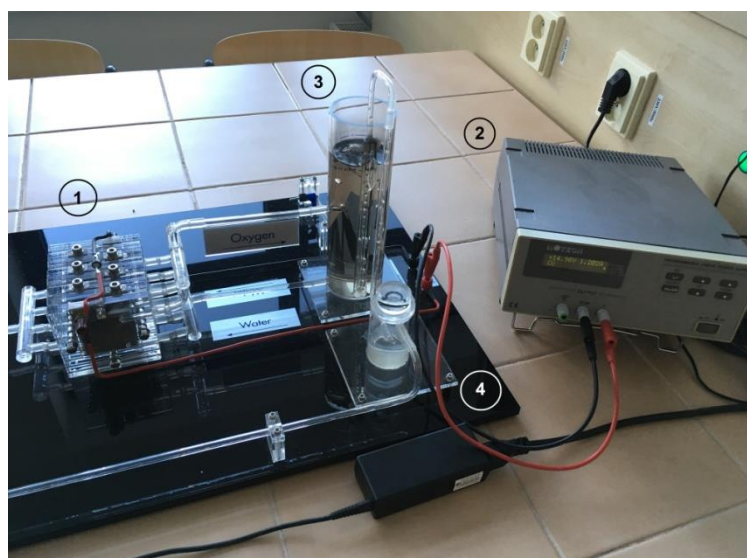
H-Tec Education sloužící k seznámení širší veřejnosti, zejména studentů na základních, středních, nebo vysokých školách s výhodami této revoluční technologie přeměny energie. Vyrábějí a inovují své modely tak, aby se co nejvíce podobaly reálným aplikacím. Jako zdroje elektrické energie pro elektrolyzéry se zde používají například solární články, nebo větrníky simulující větrnou elektrárnu. Jako spotřebič přeměněné energie dodávají například model elektromobilu. Působením v univerzitním prostředí je možností nejen pro demonstraci studentům, ale také pro spolupráci s odborníky a vědci v tomto oboru a díky tomu, mohou přicházet na trh s novými a revolučními technologiemi.

Článek měřený v této práci je produktem firmy H-TEC Education a jedná se o model StaXX Exhibition 3050.

4.3 Popis měřeného článku StaXX

Jedná se o produkt výše zmíněné firmy H-Tec model StaXX Exhibition 3050, který je starý přes deset let a již se nevyrábí, na jeho místo nastoupili inovované modely. Princip přeměny energie je ovšem stále stejný. Článek za tyto roky diskontinuálního provozu, zejména v letním období, kdy jsou prázdniny, značně zestárnul a ztratil své jmenovité parametry, není schopen dodávat již takový výkon, jako na počátku. Vliv stárnutí článku si popíšeme v kapitole 5.2.4.

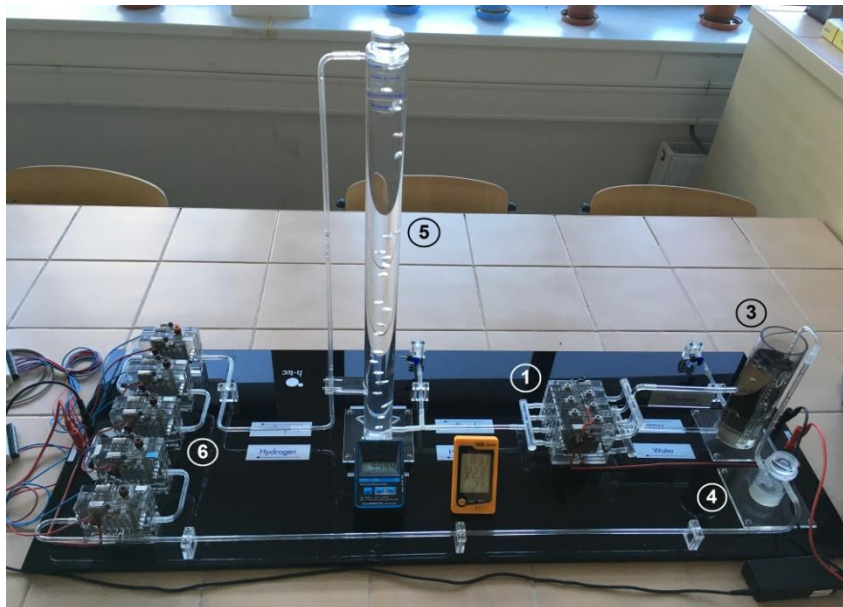
Tento produkt je určen pro výukové a demonstrační účely této technologie širší veřejnosti, za tímto účelem je vyroben z transparentního průhledného polymeru a tak je struktura všech komponentů dobře viditelná.



Obrázek 12: Fotografie části článku s elektrolyzérem

Jako zdroj vodíku je zde použit sedmi-membránový elektrolyzér (1) napájený programovatelným zdrojem napětí od firmy MOTECH (2). Jak můžeme vidět na Obrázku 12, voda je do elektrolyzéru přiváděna čtyřmi vstupy do spodní části z otevřené zásobovací nádoby (3). Na stejné straně v horní části můžeme vidět další výstupy, ty jsou zde pro kyslík, vedlejší produkt generace vodíku, který se v této aplikaci dále nevyužívá. Z levé strany poté už vystupuje vodík. Elektrolyzér se při provozu vlivem reakcí v něm probíhajících značně zahřívá. Pro výrobu vodíku, co možná nejvíce čistého, je zde použita destilovaná voda nejvyšší čistoty, ta je do elektrolyzéru přiváděna z otevřené zásobovací nádobky (3), která má ryskami vyznačené optimální rozmezí hladiny vody, ta se při provozu mírně odpařuje a je nutno ji občas doplňovat. Do zásobovací nádobky je

voda přiváděna také z přepadové nádoby (4), do které voda přichází z pátého článku. Vody vyprodukované reakcí příliš není, k většímu přepadu dochází zejména při počátečním zavodnění článků.



Obrázek 13: Člákový celek s popisem

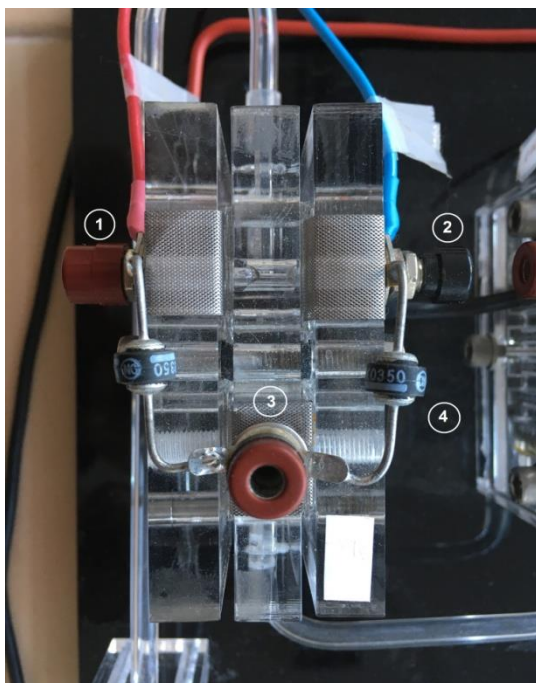
Vodík z elektrolyzátoru dále putuje do vysokého sloupcového zvlhčovače (5) téměř celého plného vody, kterým prochází bubliny vodíku, jeho molekuly na sebe váží molekuly vody a tak dochází ke zvlhčení plynu před vstupem do článků a navíc ke zvýšení tlaku v systému, který je vyšší, než atmosférický. Takto zvlhčený plyn zaručuje optimální saturaci membrány vodou při provozu. Na vrchu zásobníku je uzávěr s těsněním, zamezující úniku plynu, který lze snadno odšroubovat a doplnit kapalinu do rozmezí vyznačeného ryskami MIN a MAX.

Další částí vodíkového okruhu je článková část (6), kde dochází k přeměně paliva na elektrickou energii. Články jsou dvou-membránové, tzn. každý z nich má dvě MEA struktury (tzv. stack článek), které jsou odděleny bipolární deskou s vyfrézovanými drážkami, pro rozvod vodíku, dvojitá struktura je patrná na obrázku 14. Vodík je přiváděn trubičkou do středového dílu prvního dvou-membránového palivového článku, je distribuován MEA strukturám a dále je veden propojovací trubičkou do středového dílu dalšího článku a tak prochází všemi pěti články. Krajiní desky slouží k přívodu okysličovadla a ke stažení struktury šrouby, lze vidět na Obrázku 15. Tyto články jsou každý označeny svou barvou, článek 01 - bílá, 02 - červená, 03 - zelená, 04 – modrá, 05 – žlutá (viz Obrázek 16), zejména proto, že tyto barvy poté figurují v grafu software

rozhraní LabVIEW pro měření těchto článků, podrobněji v další kapitole.

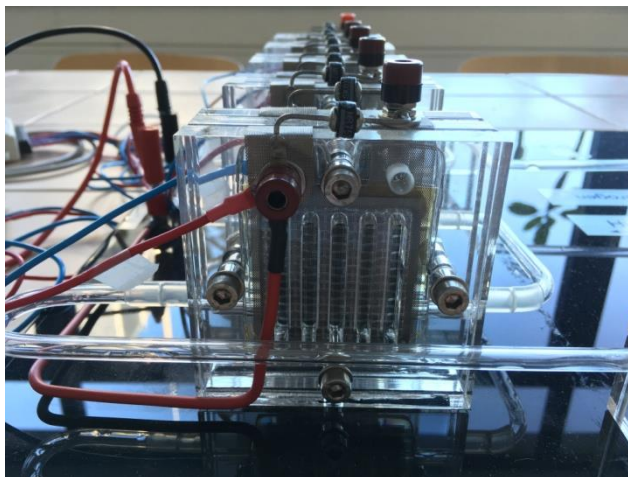
Také si zde můžeme všimnout propojení vývodu anody s vývodem z katody. Propojení je realizováno sítčkou, která slouží jako sběrač náboje v článku a je přímo vyvedena, na ní je pak umístěna trojice výstupních elektrod. Po stranách, kladná elektroda (1) a záporná elektroda (2). Mezi jednotlivými elektrodami jsou umístěny diody, které zamezují přepólování během depolarizace článku.

Na Obrázku 18 je dobře vidět, že z každého článku vystupuje dvojice, modrý a červený, drátů pro snímání napětí jednotlivých článků. Články jsou vzájemně propojeny i mezi sebou. Celkové napětí je pak vyvedeno z krajních článků, černým drátem z 1. článku a červeným z 5., na elektrody umístěné na konci panelu. Z těch je pak přímo napájena zátěž.



Obrázek 14: Detail na článek shora

Okysličovadlo v podobě kyslíku je na membránu přiváděno přímo z okolního prostředí drážkami po obou stranách článku, které jsou vidět na obrázku 15.



Obrázek 15: Detail na články ze strany

Přebytečný vodík a vyprodukovaná voda se odvádí trubičkou z posledního pátého článku (Obrázek 15) do vyrovnávací nádoby, která byla zmíněna již dříve. Odtud je vodík veden trubičkou do posledního stupně systému, který se nachází v otevřeném zásobníku (3). Jedná se o trubici, pevně spojenou se dnem této nádoby a částečně zaplněnou vodou. Vodík probublává vodním sloupcem, díky tomu se udržuje v systému stálý přetlak, do okolního prostředí.

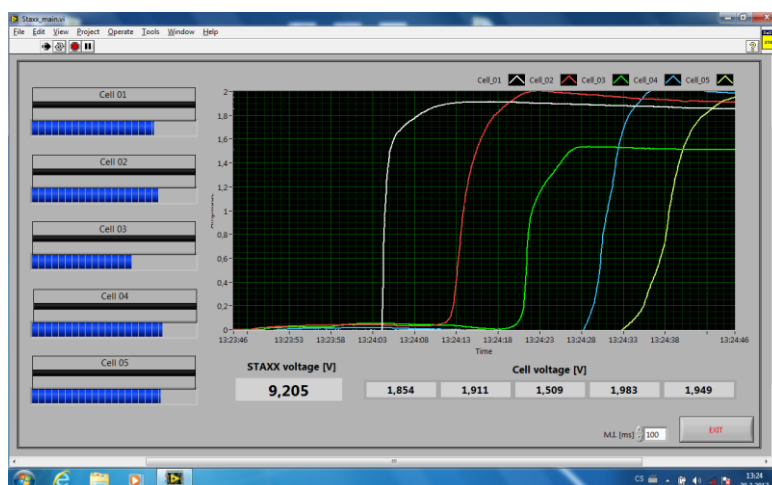
Při přerušení dodávky vodíku je systém článků díky nádobám s vodou ((3) a (5)) z obou stran uzavřen, a tak dochází ke konzervaci zbytku paliva v části okruhu s články. Díky tomu si články zachovají zbytkový potenciál, který vydrží v řádech hodin, i dnů odstávky. Zátěž je realizována umělohmotným ventilátorem v podobě stylizované květiny v květináči. Model je vybaven stejnosměrným motorem, na modelu květináče je umístěn spínač pro zapnutí a vypnutí zátěže (Obrázek 16).



Obrázek 16: Zátěž

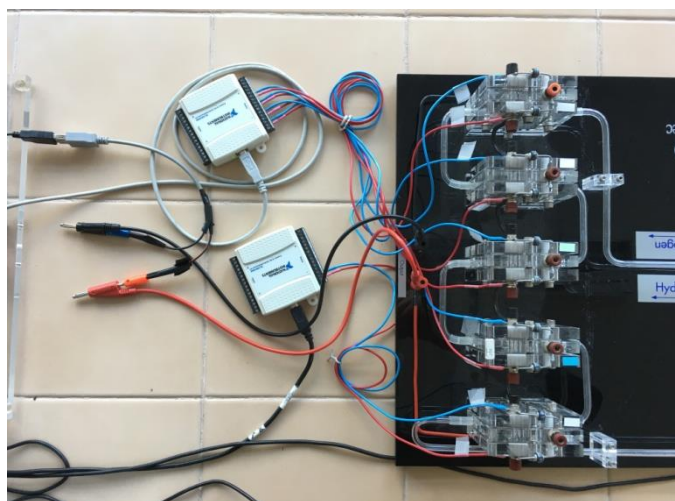
4.4 Popis měřicího prostředí LabVIEW

Tento software je produktem dřívějších bakalářských prací a v současné době dochází k jeho modernizaci kolegy. Jedná se o jednoduché měřicí prostředí, ve kterém se vypisují a graficky znázorňují stavy jednotlivých napětí článků Cell voltage [V], ty jsou barevně odlišeny, a poté i jejich součet v celkovém napětí STAXX voltage [V]. Dílčí napětí se také promítá do časové osy grafu.



Obrázek 17: Měřicí prostředí LabVIEW

Propojení s články je realizováno pomocí dvou A/D převodníků National Instruments, které jsou připojeny k počítači přes USB port a dále pak na výstupy jednotlivých článků, jak můžeme vidět na Obrázku 18. Celkové napětí článků ze svorek na panelu je vedeno na zátěž.



Obrázek 18: Články a A/D převodníky

5. Provoz a náběh PEM článku

Tato kapitola je zaměřena na parametry ovlivňující provoz článku, jako jsou termodynamické veličiny, složení a koncentrace paliva, životnost článku, hydratace membrány a vliv proudové hustoty. Dále pak na významné parametry ovlivňující jeho nájezd a možnost jejich optimalizace.

5.1 Parametry související s účinností článku

Nastíníme si Gibbsovu volnou energii, pomocí níž lze vyjádřit účinnost článku a poté ztráty figurující při provozním stavu článku.

5.1.1 Gibbsova volná energie

Gibbsova volná energie (GVE) udává energii obsaženou v palivu schopnou konat užitečnou práci. A vyjadřuje tak, kolik elektrické energie lze z paliva získat elektrochemickou přeměnou. Rozdíl hodnot GVE mezi reaktanty a produkty se nazývá změna Gibbsovy volné energie, a udává množství uvolněné energie chemickou reakcí v jednotkách J/mol . Tímto způsobem lze dobře reakci mezi vodíkem a kyslíkem kvantifikovat.

Velikost GVE není konstantní, ale je závislá nejen na teplotě, ale také na tlaku a koncentraci paliva. To znamená, že dochází ke změně vratného potenciálu článku. Při elektrochemické reakci nedojde k přeměně veškeré této energie pouze na elektrickou, ale vlivem nevratných ztrát také k přeměně na teplo. [1]

5.1.2 Ztráty v zatíženém palivovém článku

Hodnota napětí klesá s proudovým zatížením vlivem ztrát způsobených převážně elektrochemickými procesy. Ztráty nazýváme polarizace a máme tři základní druhy. Všechny tyto polarizace můžeme vidět znázorněné v grafu níže (Obrázek 19).

Aktivační polarizace

Jde o ztrátovou aktivační energii, kterou je potřeba dodat k nastartování elektrochemické reakce na povrchu elektrod a překonat aktivační bariéru, která je způsobena slabou, nebo

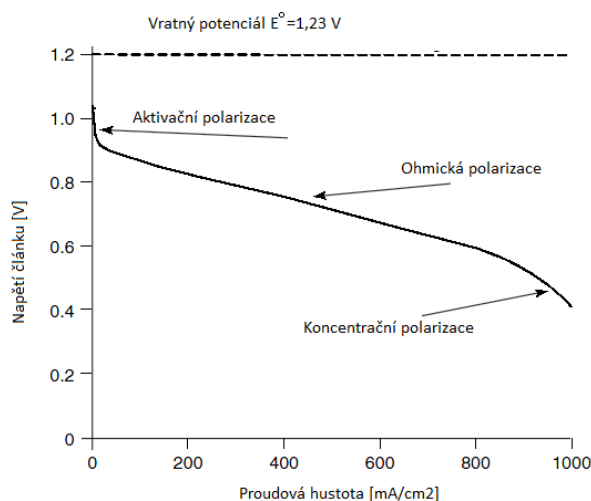
vůbec žádnou kinetikou elektrod, její velikost je dána katalyzátorem. Tato energie je také závislá na struktuře elektrod a aktivitě reaktantů. [1]

Ohmická polarizace

Tyto ztráty se vyskytují za běžného provozu článku a jsou závislé na vlastnostech použitých materiálů, na iontovém odporu elektrolytu a elektrod, dále na elektrickém odporu elektrod, bipolárních desek a proudových sběračů. A dále pak na některých konstrukčních parametrech, jako je vzdálenost elektrod. Ztráty jsou také úměrné proudové hustotě a závislé na teplotě, lze je vypočítat Ohmovým zákonem. [1]

Koncentrační polarizace

Jde o ztráty zapříčiněné vysokým proudovým zatížením článku, kdy jsou přiváděné reaktanty spotřebovány rychleji, než mohou být dodávány a vlivem tohoto procesu nedochází k produkci dostatečného množství elektronů a dochází ke snížení výkonnosti článku. Průchod reaktantů je omezen především strukturou elektrody. [1]



Obrázek 19: Polarizační křivka palivového článku [1]

5.2 Parametry ovlivňující provoz palivového článku

Jedná se o proměnné provozní veličiny, jako je teplota, tlak, složení vstupujících plynů, míra hydratace membrány a neodvratné stárnutí článku.

5.2.1 Vliv provozní teploty

Článek s polymerním elektrolytem se řadí mezi nízkoteplotní a běžně pracuje při teplotách v rozmezí od 20 °C do 90 °C. Provozní teplota, při níž článek pracuje, má vliv na vratný potenciál článku, který úzce souvisí se změnou Gibbsovy volné energie. S rostoucí teplotou se tato energie zmenšuje a tak se zmenšuje i vratný potenciál a to o 0,84 mV na 1 °C, při předpokladu, že výsledným produktem je voda v kapalném stavu. Zatím co se vratný potenciál a GVE s rostoucí teplotou zmenšuje a může se zdát, že i výsledný výkon. Naopak s teplotou roste vnitřní energie reaktantů, dochází ke snížení aktivační energie a k urychlení reakcí na elektrodách. Také dochází k poklesu iontového odporu elektrolytu, tudíž k lepší difuzi plynů skrze membránu a díky tomu se posouvá hranice poklesu napětí vlivem koncentračních ztrát do vyšších proudových hustot. Výsledným efektem je zvýšení výkonu palivového článku.

Tento pozitivní vliv zvyšování provozní teploty je realizovatelný jen do určité kritické hranice teploty. Poté dochází vlivem příliš vysoké teploty k rychlému odparu saturační a vyprodukované vody z polymerní membrány, ta se dehydratuje a dochází ke snížení její iontové vodivosti. Vlivem toho dochází naopak ke snížení výkonu článku. Pozitivní vliv zvyšování výkonu je pozorovatelný do zhruba 50 °C od této hranice výkon prudce klesá. Pokud se provozní teplota dostane do okolí 100 °C a vyšší, voda se dostává do varu a dochází k jejímu odpařování. Vlivem vodní páry dochází ke snížení tlaku kyslíku, jehož koncentrace poklesne a dojde opět ke snížení výkonu článku. Tomu můžeme zamezit zvýšením provozního tlaku systému a díky tomu se zvýší bod varu vody. Pro provoz článku při vyšších teplotách je navíc zapotřebí přivádět větší množství vody v podobě vstupních zvlhčených plynů, které je zapotřebí také ohřívat, ideálně na stejnou teplotu. Pokud by vstupní plyny neměly dostatečnou teplotu, docházelo by k vysychání membrány. Naopak, kdyby byla provozní teplota článku nižší, než teplota vstupních zvlhčených plynů, docházelo by k nadměrné produkci vody a membrána by byla příliš zavodněná a opět by došlo k poklesu výkonu.

Provozování PEM článků při vyšších tlacích a teplotách nemá takový efekt a proto se s

tímto použitím příliš často nesetkáme. [1]

5.2.2 Vliv provozního tlaku

Zvýšení provozního tlaku zapříčiní nárůst GVE, ta je úzce spjata s nevratným potenciálem, který se vlivem nárůstu tlaku sníží. Dochází k celkovému nárůstu polarizační křivky. Vyšší tlak zapříčiňuje větší koncentraci molekul plynu, zvýší se jeho parciální tlak, to má za následek lepší prostupnost vodíku a kyslíku k místu reakce s katalytickou vrstvou elektrod. Proto celkový výkon článku vzroste. Zvýšení tlaku je výhodné při velkém proudovém zatížení, kdy nastává jev koncentrační polarizace (5.1.2.3), vlivem toho se zrychlí kinetika elektrochemických reakcí a tak dojde ke stabilizaci.

Navíc při vyšším tlaku nedochází k tak velkému odparu vody z elektrolytu. A však zvýšení výkonu změnou tlaku snižuje celkovou účinnost systému, neboť je zapotřebí přidavně navýšit tlak vzduchu a to spotřebuje značné množství vyprodukované energie. [1]

5.2.3 Vliv složení a koncentrace paliva

Reaktanty vodík a kyslík, vstupující do reakce, mají různou hustotu aktivních látek (H_2 , O_2), to lze vyjádřit pomocí jejich parciálního tlaku. Články s polymerním elektrolytem jsou citlivé na čistotu vstupního paliva, zejména na minimální koncentraci oxidu uhelnatého, který má neblahý vliv na katalytické účinky platiny obsažené v katalytické vrstvě elektrod, dochází ke zpomalení celé elektrochemické reakce a snížení výkonu článku.

Vlivem nečistot dochází navíc k vyplavování platinové černi a dochází tak k degradaci článku. Obsah vodíku v palivové směsi je majoritní, a proto je jeho parciální tlak vysoký. Okysličovadlo v podobě okolního atmosférického vzduchu má podíl kyslíku jen něco málo kolem 20% a jeho parciální tlak je nízký. Pokud bychom koncentraci kyslíku navyšovali, za předpokladu, že máme i dostatek vodíku pro vyrovnanou reakci, výkon článku by se navyšoval až do doby, kdy by jeho parciální tlak byl maximální, to znamená, jednalo by se o čistý kyslík. Tímto se posune celá polarizační křivka, ale také dojde k zamezení koncentračních ztrát.

5.2.4 Vliv životnosti článku

Životnost, a s ní spojený výkon, hraje roli především u MEA struktury. Ta ztrácí své chemické a mechanické vlastnosti a je u ní předpokládána určitá omezená doba životnosti.

Dochází ke stárnutí membrány, která ztrácí svou iontovou vodivost a může ztrácet i své mechanické vlastnosti, kdy může dojít k poškození její struktury a to má fatální vliv na funkčnost článku. V elektrodách může docházet k ucpávání pórů struktury nečistotami obsaženými v reaktantech a k vymývání tenkého filmu katalytické platiny. To má za následek zpomalení celé kinetiky reakce a zvýšení především aktivačních a koncentračních ztrát. Běžná životnost článků se dnes pohybuje v řádu tisíců provozních hodin (8000 – 16000 hodin), za předpokladu kontinuálního provozu. [1]

5.2.5 Vliv hydratace membrány

Optimální hydratace je nezbytná pro správný chod a výkon palivového článku. Zejména proto, že díky ní dosahuje polymerní membrána potřebné iontové vodivosti. K masivní hydrataci membrány, kdy prolijeme článek vodou, dochází bezprostředně před uvedením článku do provozu a poté se hydratace membrány udržuje pomocí zvlhčeného vstupujícího vodíku.

5.2.6 Vliv proudové hustoty

V závislosti na velikosti proudového zatížení na výstupu článku dochází k různým polarizacím, které jsme si zmínili v kapitole 5.1.2. Vlivem těchto ztrát dostává volt-ampérová charakteristika tvar jako na Obrázku 19. Při nízkém proudovém zatížení dochází k poklesu napětí a výkonu vlivem aktivačních ztrát. Naopak při vysokém proudovém zatížení dochází k poklesu napětí a výkonu vlivem ztrát koncentračních. Při běžném provozu poté dominují ztráty ohmické. Nejvyššího výkonu článek dosahuje na pomezí ohmických a koncentračních ztrát. Pro běžný provoz se však volí raději hospodárnější pracovní oblast s lepší účinností. [1]

5.3 Parametry ovlivňující náběh palivového článku a jejich optimalizace

V této kapitole si nastíníme některé parametry, které mají zásadní vliv na náběh palivového článku z odstaveného režimu. Tyto parametry úzce souvisí s provozními parametry. Za odstávku považujeme stav, kdy je článek bez přístupu paliva a bez připojené zátěže. Parametry hrající roli při nájězdu článku do provozního režimu jsou především: saturace membrány vodou, množství a tlak vstupního paliva, doba předešlé odstávky a další parametry.

5.3.1 Saturace membrány vodou

Saturace membrány vodou hraje významnou roli nejen při provozu, ale také při nájězdu palivových článků. Optimální navlhčení membrány je důležité pro správnou funkčnost článku, jak jsme si popsali v kapitole 5.2.5. Před uvedením do provozu může být membrána značně vysušená, zde hraje roli také předešlá doba odstávky článku. Proto je dobré články před každým uvedením do provozu masivně zavodnit. Membrána absorbuje potřebnou vlhkost do své struktury a přebytečná voda z pórovité struktury elektrod je následně vytlačena procházejícím vodíkem.

5.3.2 Dodávka paliva

Jde především o množství a tlak dodávaného paliva. Je zapotřebí, aby vodík prostoupil kompletně celou strukturu elektrod článku a tak došlo k plnému nasycení polymerní membrány a vytlačení přebytečné vody po zavodnění. Čím vyšší tlak palivo má, je vyšší jeho parciální tlak a tím pádem koncentrace vodíku v něm a díky tomu je jeho náběh rychlejší (kapitola 5.2.2). Množství a tlak paliva u námi měřeného článku můžeme regulovat příkonem elektrolyzéro.

5.3.3 Doba předchozí odstávky

Odstávka je doba, po kterou je článek ve stavu nečinnosti, to znamená bez přívodu paliva potřebného pro elektrochemickou reakci a bez připojené zátěže. Po uvedení článku do odstavného režimu, dojde k přerušení palivového okruhu z obou stran článkové části, díky nádobám s vodou. Zbytek paliva je tak akumulován v článkové části, membrány tak vydrží

saturovány vodíkem i několik hodin, než vodík difunduje do okolí. Dalším faktorem je hydratace membrán. Membrány po delší odstávce vysychají a je třeba je před uvedením do provozu opět zavodnit (kapitola 5.3.1). Saturaci vodou při provozu již zajistí zvlhčený vstupní plyn.

5.3.4 Další parametry

Vliv hrají i parametry okolního prostředí, a to relativní vlhkost, teplota a tlak vzduchu. Tyto faktory také ovlivňují přímo rychlost vysychání membrány. U tohoto palivového článku je oxidant v podobě vzduchu přiváděn přímo z okolního prostředí průduchy v nosné konstrukci rovnou na oxidační elektrodu i během doby, kdy je článek odstaven.

6. Měření časové závislosti náběhové fáze po předešlé odstávce

Tato část je zaměřena na měření časové závislosti náběhové fáze na předchozí odstávce. Má za úkol diskutovat a vyhodnotit parametry mající vliv na náběh palivového článku v závislosti na předešlé odstávce. V závěru této kapitoly zhodnotíme a shrneme závislost doby odstávky a jednotlivých parametrů na době náběhu.

6.1 Použité přístroje

Pro měření hodnot relativní vlhkosti a teploty v místnosti byl použit digitální měřicí přístroj CEM DT-322 (Obrázek 20).



Obrázek 20: Měřicí přístroj pro měření relativní vlhkosti a teploty v místnosti

Jako další měřicí přístroj pro odečet tlaku v místnosti byl použit Greisinger electronic GTD 1100 (Obrázek 21).



Obrázek 21: Měřicí přístroj Greisinger electronic GTD 1100

Pro napájení elektrolyzátoru byl použit regulovatelný programovatelný lineární zdroj Motech (Obrázek 22).



Obrázek 22: Regulovatelný zdroj Motech

Ke grafickému znázornění průběhů napětí na jednotlivých článcích bylo použito software rozhraní LabVIEW, které jsme si popsali v kapitole 4.4.

6.2 Postup měření

Zde bude nastíněna sekvenci kroků, jak šly po sobě, při samotném měření časové závislosti náběhu na době odstávky palivového článku.

6.2.1 Doplnění provozních kapalin a spuštění PC

Jako první bylo nutné zkontrolovat hladiny vody v otevřeném zásobníku a sloupcovém zvlhčovači a případně je doplnit. Zároveň byl spuštěn notebook, aby mezi tím došlo k jeho nastartování a byl připraven pro následující měření.

6.2.2 Odečet parametrů v místnosti

Byl zapnut měřicí přístroj pro měření tlaku v místnosti, přístroj pro měření teploty a relativní vlhkosti běžel permanentně a tak nebylo třeba ho spínat. Následně byl proveden odečet teploty, relativní vlhkosti a tlaku v místnosti (přístroje kapitola 6.1).

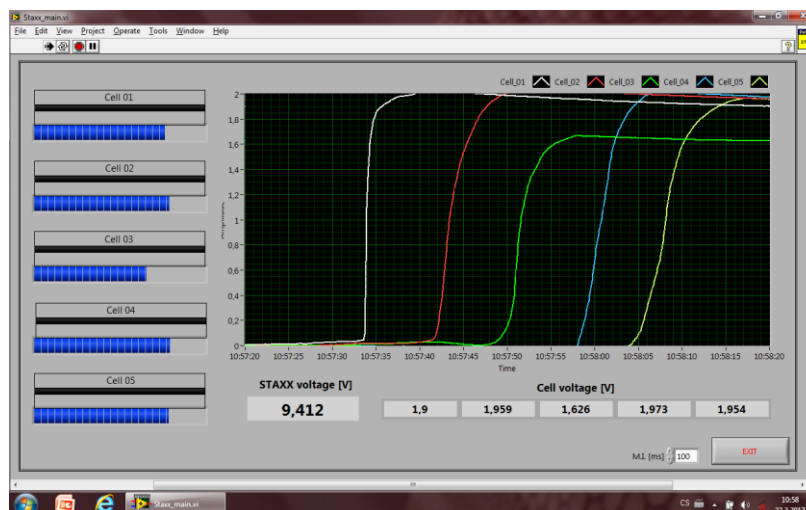
6.2.3 Sepnutí zdroje vodíku

Zdrojem vodíku, jak bylo zmíněno v kapitole 4.3, je sedmi-membránový elektrolyzér. Napájecí regulovatelný zdroj elektrolyzéro, který můžeme vidět na Obrázku 22, byl po celou dobu měření nastaven na konstantní hodnotu napětí 15 V a proudu 2,5 A. Elektrolyzér při takovém napájení dodává velké množství vodíku o vysokém tlaku a je tak zajištěno, že ve všech pěti článcích, především v posledním pátém, je dostatečné množství paliva pro reakci. A nedochází tak ke koncentračním polarizacím.

Sepnutí zdroje polohovacím tlačítkem ON/OFF do polohy ON (sepnuto) bylo provedeno již při odečtu okolních parametrů. Zdroj do doby, než dojde k sepnutí výstupu, žádný výkon nedodává. A alespoň se za tuto dobu, odečtu z měřících přístrojů nastartuje a zkalibruje. Jakmile jsou hodnoty odečteny, následuje sepnutí (ON) tlačítka OUTPUT (výstup). Zdroj začne dodávat potřebný výkon elektrolyzéro a ten během několika sekund najede do provozu a začne generovat vodík. Ten v okamžiku, kdy projde sloupcovým zvlhčovačem, zaplní jednotlivé struktury elektrod článků a začne se na nich zvyšovat napětí. Následuje další krok.

6.2.4 Hydratace PEM článků

Polymerní membrána vlivem odstávky ztrácí svou vlhkost a vysychá, proto je nutné před každým uvedením do provozu membránu hydratovat. Hydratace pomocí zvlhčených vstupních plynů ze zvlhčovací nádoby není dostatečná, a tak je prováděna pomocí přepadu vody ve sloupcovém zvlhčovači. Vlivem průchodu vodíku se hladina v zásobníku zvýší až téměř k vývodní trubičce pro vodík v horní části, záleží také, kolik kapaliny je do nádoby dolito. Pro docílení přepadu vody je nutné sloupcovou nádobu mechanicky rozkmitat, aby došlo k jejímu vychýlení z klidového stavu a přelítí skrze trubičku. Voda poté pokračuje přímo do prvního článku, jeho struktura se zaplní a voda pokračuje dále, až postupně projde všemi pěti články a vyteče z posledního. Zavodnění je tak dostatečné a přestaneme iniciovat nádobku mechanickými impulsy. Tlak vodíku následně vytlačí přebytečnou vodu ze struktury článků. Na článcích se začne zvyšovat napětí a začne nabíhat do provozu, jak můžeme vidět na Obrázku 23.

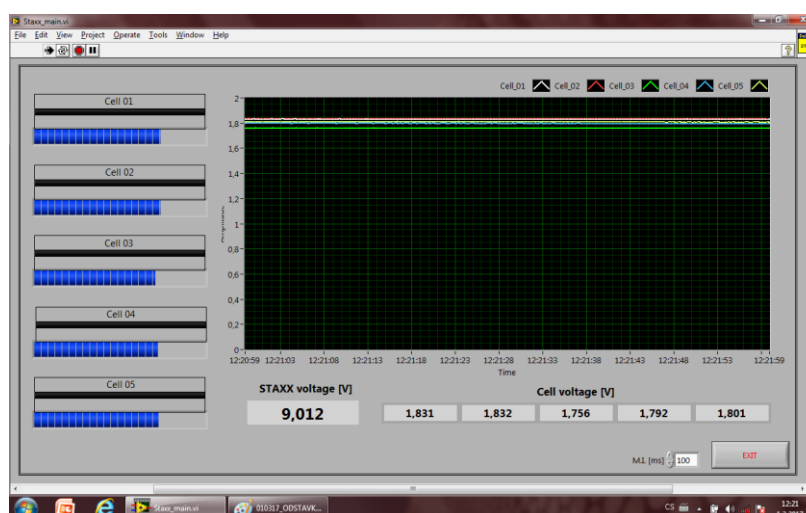


Obrázek 23: Inicializace článků po zavodnění

Na obrázku výše můžeme vidět posloupnost nabíhajících článků. Vodík je dodán jako první článku 1 a tak nabíhá jako první (bílá charakteristika), následují postupně další články. Na počátku je překmit napětí vysoký na Obrázku 23 je hodnota 9,412 V, ale poté se jeho hodnota ustálí níže, kolem hranice 9 V.

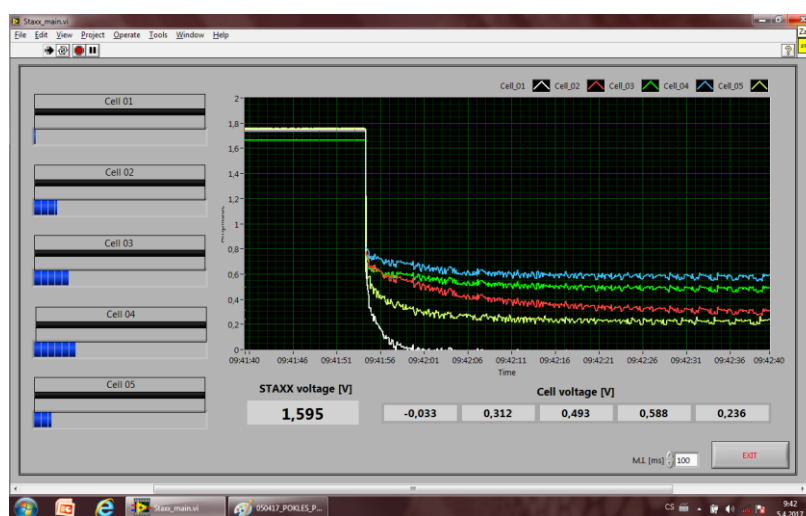
6.2.5 Připojení zátěže

Po hydrataci a zvýšení napětí na článcích následuje krátký časový úsek (kolem pěti minut), kdy je z článků pomocí tlaku plynu vytlačena přebytečná voda a články se saturují vodíkem a nabíhají do provozního stavu. Během této doby se hodnota napětí článků naprázdno ustálí kolem 9 V, tento ustálený stav můžeme vidět na Obrázku 24.



Obrázek 24: Ustálené napětí článků naprázdno

Po uplynutí doby, kdy se napětí článku ustálí na přibližné hodnotě 9V, je možné připojení zátěže na výstup. Tato doba je proměnná a závisí také na délce předchozí odstavky. Výkon článku zátěž sám nerozpohybuje a tak je nutné připnutí realizovat tak, že je nejprve dodán mechanický impuls rukou do rotoru větrníku (kytky), po směru hodinových ručiček, a následně sepnut spínač umístěný na základně zátěže (zelené tlačítko v květináči kytky, kapitola 4.3). Zátěž odebírá proudy v řádech jednotek miliampér. Pokud jsme provedli správně startovací sekvenci včetně zavodnění a podobně, větrník by měl udržet své otáčky. Pokud by se nám zdálo, že vrtule zátěže zpomaluje, je nutné ji odepnout, chvíli počkat a akci opakovat, kapitola 6.2.5.1.



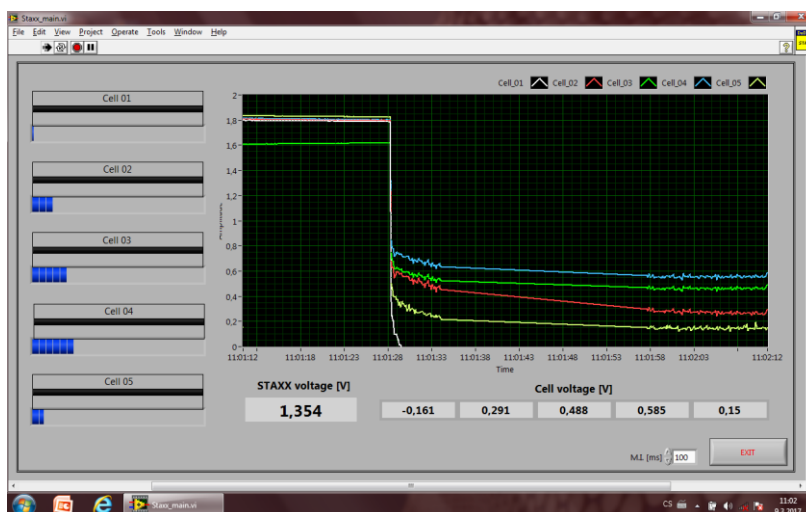
Obrázek 25: Články po připnutí zátěže

Před připojením zátěže se první a druhý článek jeví jako dva elektricky nejtvrďší články. Jak můžeme vidět na obrázku výše, po sepnutí zátěže už tomu tak není a dostávají se naopak do pozadí ostatních. U prvního článku navíc ve většině případů lze pozorovat depolarizaci, kdy se napětí na něm při náběhu dostává do záporných hodnot. Aplikací tzv. Relaxace, kdy opakujeme chod naprázdno a zatížený stav, lze tyto náběhové procesy urychlit a článek se tak dostane rychleji do provozního stavu.

Relaxační režim

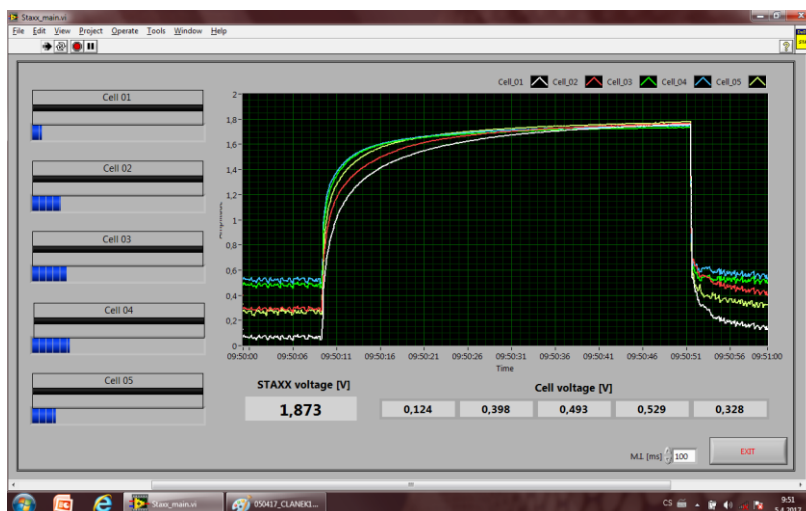
Relaxační cyklus aplikujeme, jsou-li některé články v depolarizaci (záporný potenciál, Obrázek 26) a nedosahují dostatečných provozních parametrů, výstupní napětí pod hodnotou 1,3 V. Článek by i přes to mohl proudový odběr udržet a rozeběhnout se, ale díky relaxaci se proces urychlí. Celý princip tkví v tom, že střídáme provoz naprázdno se

zatíženým stavem. Při odepnutí zátěže dochází k naplnění článků vodíkem a saturaci, ty regenerují a obnovují svůj plný napět'ový potenciál naprázdno. Napětí článků naprázdno a jejich průběhy sledujeme v měřicím prostředí LabVIEW. V okamžiku, kdy dojde k obnovení jejich celkového potenciálu na úroveň kolem 9 V, připneme zátěž. Pokud jsou články opět v depolarizaci, tento proces opakujeme, až dokud články nejsou stabilní v kladných hodnotách.



Obrázek 26: Stav po sepnutí, první článek v depolarizaci

Na dalším obrázku můžeme vidět průběh relaxačního cyklu, odepnutí zátěže a následné připnutí. (Obrázek 27)



Obrázek 27: Relaxační cyklus

6.2.6 Náběh článku

Článek jsme považovali za naběhlý, pokud byl schopný udržet zátěž v chodu, to i za situace, kdy se první článek nacházel v depolarizaci. Ten se během několika minut dostal do kladných hodnot, zatímco ostatní články dostačují pro udržení zátěže v chodu.

6.2.7 Provozní stav článku

Za optimální provozní stav článku považujeme, když se jeho výstupní napětí při zatíženém stavu pohybuje kolem 1,88 V. Článek byl ponechán po každém náběhu alespoň hodinu v provozu, aby se ustálil kolem této hodnoty. Až poté následovala odstávka. Při provozu se články ustálí v následujícím pořadí (řazeno podle velikosti výstupního napětí): 4. a 3. jsou nejvýkonnější a téměř shodné (pohybují se kolem hodnoty 0,5 V) poté 2. a 5. jsou také shodné (cca 0,3 V) a 1. článek (cca 0,2 V).

6.2.8 Odstávka článku

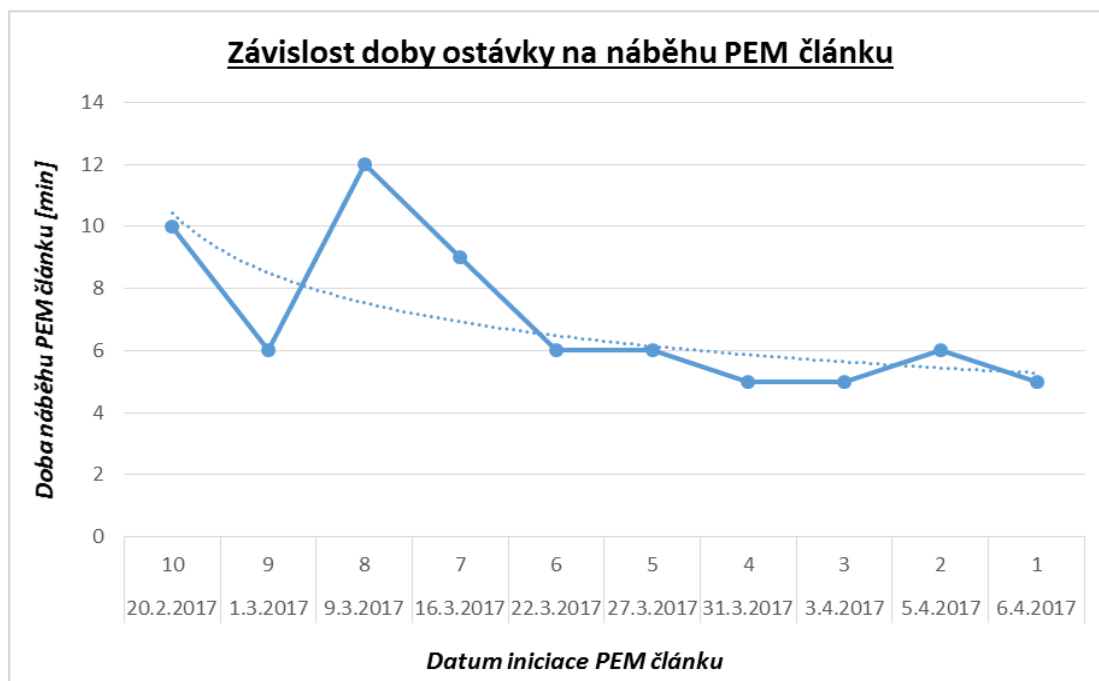
Před uvedením článku do odstavného režimu je dobré jej nechat zaplnit a plně saturovat vodíkem. Proto následně po odepnutí zátěže, než vypneme zdroj vodíku, necháme článek nějakou chvíli zrelaxovat. Články jsou schopny nějakou dobu uchovat množství vodíku ve své struktuře a jsou tak lépe připraveny na případný následující provoz.

6.3 Výsledky měření

Na článku byla měřena doba náběhu postupně po odstávce od 10 dnů do 1 dne (odstávka [dny]).

Datum odstávky/náběhu	odstávka [dny]	ČAS [hh:mm]			režim relaxace	doba náběhu [min]	doba odstávky [h]	MÍSTNOST		
		iniciace	náběhu	odstávky				teplota [°C]	tlak [mbar]	vlhkost [%]
10.2.2017				13:30						
20.2.2017	10	13:10	13:20	14:20	0	0:10	239,6	23	974,5	24
1.3.2017	9	10:46	10:52	12:20	2	0:06	212,3	22,5	962,9	25
9.3.2017	8	11:00	11:12	13:00	3	0:12	190,7	23,6	975,5	27
16.3.2017	7	10:55	11:04	13:05	0	0:09	165,9	23,3	982,2	22
22.3.2017	6	11:56	12:02	12:45	0	0:06	141,9	22,9	973,4	29
27.3.2017	5	9:15	9:21	10:22	0	0:06	116,5	22,5	984,4	23
31.3.2017	4	9:12	9:17	10:20	0	0:05	94,8	23,2	979	29
3.4.2017	3	9:16	9:21	10:05	1	0:05	70,9	23,7	980,9	33
5.4.2017	2	9:35	9:41	10:30	0	0:06	47,5	23,8	979,5	35
6.4.2017	1	9:05	9:10		0	0:05	22,6	23,2	978,2	29

Tabulka 1: Závislost doby náběhu na předešlé odstávce a dalších parametrech



Graf 1: Závislost doby náběhu na předešlé odstávce

Na grafu je vidět, že s rostoucí dobou odstávky se průměrná doba náběhu zvyšuje, což jsme předpokládali. Od hranice šestidenní odstávky je průměrná doba náběhu kolem šesti minut a tuto hodnotu můžeme předpokládat za standardní dobu náběhu.

6.4 Vliv časového hlediska na jednotlivé parametry

Zde si vyhodnotíme jaký vliv má časová odstávka na jednotlivé parametry související s náběhem článku do provozu.

Jak jsme si zmínili v předchozích kapitolách, jedním z hlavních parametrů, který hraje při náběhu roli je hydratace membrány. Membrána je schopna si po určitou dobu nečinnosti udržet určitý stupeň hydratace. Ta se ovšem s narůstající dobou odstávky snižuje, až vyschne úplně. Takové membráně trvá delší dobu, než se při náběhu hydratuje na potřebnou úroveň a tudíž i než se dostane do provozuschopného stavu.

S vysycháním membrány přímo souvisí také parametry okolního prostředí a tím je v tomto případě oxidant v podobě vzduchu. Ten je přiváděn přímo na strukturu membrány i v době nečinnosti, díky průduchům v konstrukci PEM článků. Vzduch v místnosti má nekonstantní časem se měnící parametry, jako teplotu, vlhkost a tlak. Dalším parametrem je dočasná akumulace vodíku v člancích. Ty vydrží po určitou dobu saturovány vodíkem, nanejvýš však dva dny, nejdéle první článek. Jedná se o plyn s nízkou molekulární hustotou a tak dochází k jeho úniku strukturou článkového komplexu. Kdybychom byli

schopni udržet stálou vodíkovou a kyslíkovou atmosféru uvnitř článků během odstávky, doba náběhu by se pravděpodobně snížila.

Ostatní parametry, jako teplota, tlak a relativní vlhkost v místnosti mají jen nepatrný vliv na aktuální náběh článku a z měření tento vliv není příliš patrný.

6.5 Návrh optimální startovací sekvence PEM palivového článku

Zde je proveden návrh optimální startovací sekvence PEM palivového článku. Tento návrh je založen na sadách měření, které byly provedeny a na předešlých zkušenostech s provozem článku.

6.5.1 Sepnutí zdroje vodíku

Sepneme regulovatelný zdroj pro napájení elektrolyzéry s dostatečným výstupním výkonem (15 V, 2,5 A), aby byl zaručen dostatek vodíku pro rozběh článku. Následně sledujeme grafické průběhy napětí a čekáme, až se všechny články saturují vodíkem. Doba trvání přibližně 1-2 min.

6.5.2 Zavodnění a náběh naprázdno

Následně provedeme zavodnění článků, to zabere kolem 1 minuty. Poté počkáme, až se z článků vytlačí přebytečná voda a najedou do napětí naprázdno kolem 9 V, přibližně 5 minut.

6.5.3 Připojení zátěže a případná relaxace

Iniciujeme vrtuli zátěže mechanickým impulsem a sepneme spínač. Sledujeme průběh napětí a jeho hodnotu. Pokud se napětí zatíženého článku dostane pod hodnotu 1,3 V, zařadíme relaxaci. Nebo ji můžeme zařadit pro urychlení náběhu a navýšení napětí jednotlivých článků.

6.5.4 Provoz

Ž počátku se články chovají jako elektricky měkký zdroj napětí a některé z nich mohou být v depolarizaci. Záleží také na délce předchozí odstávky, ale článek by se do jedné hodiny od náběhu měl dostat na provozní parametry. V tomto okamžiku se z něho stává poměrně tvrdý zdroj a jeho výstupní napětí je kolem 1,88 V. Článek je stabilní, a napájení elektrolyzéry lze snížit na 12 V.

6.5.5 Odstávka

Před odstavením je článek dobré plně saturovat vodíkem. Po určitou dobu je schopen si tak uchovat malé množství vodíku ve své struktuře a tím je lépe připraven pro následující provoz.

7. Závěr

Úvodem této práce byla stručná historie palivových článků, seznámení s druhy palivových článků a dále rozveden více do hloubky palivový článek s polymerní membránou. Byl popsán princip přeměny energie a jednotlivé jeho komponenty.

Dále byla věnována poměrně velká část popisu jednotlivých částí námi měřeného článku STAXX Exhibition 3050 od firmy H-Tec a měřicímu komplexu, včetně software prostředí LabVIEW pro grafické znázornění výstupních veličin článku.

Majoritním úkolem této práce bylo především stanovit a dále diskutovat faktory ovlivňující jeho náběh a to i na základě studia výsledků starších diplomových prací s tímto tématem. Jednalo se zejména o parametry jako hydratace článku, dodávka paliva a vliv oxidovadla. Dále pak bylo cílem změřit se na závislost doby náběhu na předešlé odstávce. V tomto měření se potvrdil předpoklad, že se zvyšující se dobou odstávky bude narůstat doba náběhu. Náběh po odstávce jednoho, či dvou dnů je bezproblémový a téměř okamžitý. Membrány jsou po takové době stále z části hydratovány a zavodnění je tak provedeno rychleji. Články si po určité době udrží zbytek vodíku a jsou tak po dobu několika hodin, nejvýše dnů stále saturovány.

Předpokládaným výsledkem měření je, že pro článek s polymerní membránou je nejlepší nepřetržitý chod se stabilním přísunem paliva. To je ovšem v podmínkách této laboratoře nerealizovatelné. Zejména z bezpečnostních důvodů, kdy článek nemůže zůstat v chodu bez dozoru. Vlivem tohoto přerušovaného chodu článek za roky jeho provozu značně zestárl a tak již nedodává výkon jako, když byl prvně uveden do provozu. To pro měření ovšem nemělo markantní vliv a proběhlo bez problémů. Poté byl zhodnocen vliv časové odstávky na jednotlivé parametry ovlivňující náběh. A na závěr byl na základě předchozího měření stanoven optimální iniciační cyklus PEM článku.

Zdroje

- [1] PFLUG, Aleš, *Možnost zvýšení výkonu palivového článku PEM*, Bakalářská práce, Západočeská Univerzita Plzeň, Fakulta Elektrotechnická, 2012.
- [2] VLČEKL, Lukáš, *Měření vlivu koncentrace kyslíku na PEM článek*, Bakalářská práce, Západočeská Univerzita Plzeň, Fakulta Elektrotechnická, 2015.
- [4] ŠAŠEK, Tomáš, *Dynamická analýza situace PEM článku pod kyslíkovým krytem*, Bakalářská práce, Západočeská Univerzita Plzeň, Fakulta Elektrotechnická, 2015.
- [3] HORÁK, Stanislav. *Palivové články a jejich použití*, Bakalářská práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012.
Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53015
- [4] SOMOLOVÁ, Markéta, DLOUHÝ, Petr. (9. 5. 2007). *Výroba vodíku*. Získáno 20. 4. 2017, z hytep: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: DR. FRANCIS THOMAS BACON	11
OBRÁZEK 2: DR. BACON S 6kW ČLÁNKEM	11
OBRÁZEK 3: SYSTÉM PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ LETU APOLLO	12
OBRÁZEK 4: PRINCIP FUNKCE ČLÁNKU PEM	15
OBRÁZEK 5: MEA- ZÁKLADNÍ STRUKTURA ČLÁNKŮ PEM	16
OBRÁZEK 6: DETAIL NA STRUKTURY JEDNOTLIVÝCH VRSTEV	18
OBRÁZEK 7: „STACK“ ČLÁNEK SLOŽENÝ Z NĚKOLIKA JEDNOTLIVÝCH STRUKTUR	19
OBRÁZEK 8: UKÁZKA NĚKTERÝCH GEOMETRICKÝCH PROVEDENÍ DISTRIBUČNÍCH KANÁLKŮ	19
OBRÁZEK 9: GRAF PODÍLU VÝROBY VODÍKU [4]	19
OBRÁZEK 10: LOGO FIRMY DUPONT	22
OBRÁZEK 11: FOTOGRAFIE LOGA FIRMY H-TEC NA MĚŘENÉM ČLÁNKU	23
OBRÁZEK 12: FOTOGRAFIE ČÁSTI ČLÁNKU S ELEKTROLYZÉREM	24
OBRÁZEK 13: ČLÁNKOVÝ CELEK S POPISEM	25
OBRÁZEK 14: DETAIL NA ČLÁNEK SHORA	26
OBRÁZEK 15: DETAIL NA ČLÁNEK ZE STRANY	27
OBRÁZEK 16: ZÁTĚŽ	27
OBRÁZEK 17: MĚŘÍCÍ PROSTŘEDÍ LABVIEW	28
OBRÁZEK 18: ČLÁNKY A A/D PŘEVODNÍKY	28
OBRÁZEK 19: POLARIZAČNÍ KŘIVKA PALIVOVÉHO ČLÁNKU [1]	30
OBRÁZEK 20: MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ RELATIVNÍ VLHKOSTI A TEPLoty V MÍSTNOSTI	36
OBRÁZEK 21: MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ GREISINGER ELECTRONIC GTD 1100	36
OBRÁZEK 22: REGULOVATELNÝ ZDROJ MOTECH	37
OBRÁZEK 23: INICIACE ČLÁNKŮ PO ZAVODNĚNÍ	39
OBRÁZEK 24: USTÁLENÉ NAPĚTÍ ČLÁNKŮ NAPRÁZDNO	39
OBRÁZEK 25: ČLÁNKY PO PŘIPNUTÍ ZÁTĚŽE	40
OBRÁZEK 26: STAV PO SEPNUTÍ, PRVNÍ ČLÁNEK V DEPOLARIZACI	41
OBRÁZEK 27: RELAXAČNÍ CYKLUS	41

Seznam tabulek

TABULKA 1: ZÁVISLOST DOBY NÁBĚHU NA PŘEDEŠLÉ ODSTÁVCE A DALŠÍCH PARAMETRECH	42
---	----

Seznam grafů

GRAF 1: ZÁVISLOST DOBY NÁBĚHU NA PŘEDEŠLÉ ODSTÁVCE	43
--	----