

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektrotechniky a telekomunikací**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Měření vlivu koncentrace kyslíku na PEM článek**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš VLČEK**  
Osobní číslo: **E11B0264P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Měření vlivu koncentrace kyslíku na PEM článek**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Proveďte zevrubnou rešerši na téma PEM palivových článků a zaměřte se na vlivy tlaků jednotlivých plynných složek na obou stranách membrány.
2. Analyzujte provozní stavy PEM článku StaXX při normálním provozu a při aplikaci kyslíkového krytu. Zjistěte rozdíly a pokuste se je vysvětlit.
3. Proveďte možnosti přístroje pro analýzu koncentrace plynného kyslíku GHM3630 a navrhněte a realizujte jeho připojení do systému kyslíkového krytu.
4. Proměřte dynamické vlastnosti kyslíkového krytu článku při zásobování kyslíkem a výměně původní objemové náplně za novou s nárůstem koncentrace kyslíku.
5. Pokuste se využít komunikačních možností řízení přístroje GMH3630 ve spojení s PC a měření automatizujte. Stanovte základní pravidla pro provoz kyslíkového krytu ve spojení s PEM článkem.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 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: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

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



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry



V Plzni dne 15. října 2014

## **Prohlášení**

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

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

.....

V Plzni dne 5. 6. 2015

Lukáš Vlček

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Šteklovi, Ph.D. za profesionální vedení a za poskytování cenných rad a připomínek při tvorbě této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá vodíkovými PEM články a jejich výkonem, na který má vliv koncentrace kyslíku na oxidační elektrodě článku. Práce obsahuje popsané režimy, ve kterých byl PEM článek provozován. Také jsou zde uvedené možnosti měřicího přístroje oxymetru, kterým byla koncentrace kyslíku měřena, a softwaru, který byl použit k propojení oxymetru s PC. Na závěr je provedeno shrnutí naměřených výsledků.

## **Klíčová slova**

palivový článek PEM, oxymetr, kyslík, výkon

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with hydrogen PEM cells and impact on their performance caused by the concentration of the oxidizing electrode cell. This thesis contains described modes in which PEM cell was operated. There are also listed options of oximeter, which was used as measuring device to measure the concentration of oxygen and described modes of software which was used to connect oximeter with PC. The conclusion contains summary of the measured results.

## **Key words**

fuel cell PEM, oximeter, oxygen, performance

## Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	10
1 Úvod	11
2 Přehled palivových článků	12
2.1 Druhy palivových článků	12
2.1.1 Palivové články na bázi tekutých uhlíčanů (MCFC)	12
2.1.2 Palivové články s tuhými oxidy (SOFC)	14
2.1.3 Palivové články DCFC	13
2.1.4 Alkalické palivové články (AFC)	14
2.1.5 Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)	15
2.1.6 Palivové články s polymerní membránou (PEM FC)	15
2.2 Popis palivového článku s polymerní membránou	16
2.2.1 Princip činnosti	17
2.3 Provozní stavy	18
2.3.1 Atmosférický režim	18
2.3.2 Kyslíkový režim	18
2.3.3 Tlakový režim	19
2.3.4 Podtlakový režim	19
2.3.5 Nájezdový režim	20
2.4 Vliv tlaků jednotlivých plynných složek na membránu	20
2.4.1 Vzduch v systému PEM článků	21
2.4.2 Kyslík v systému PEM článků	21
2.5 Gibbsova volná energie	22
2.6 Polarizace	24
2.6.1 Aktivační polarizace	24
2.6.2 Ohmická polarizace	24
2.6.3 Koncentrační polarizace	25
3 Možnosti přístroje GMH 3691	26
3.1 Obsluha přístroje	26
3.2 Elektroda GGO 370	28
3.3 GSOFT 3050	28
3.4 Realizace spojení přístroje GMH 3691 s PC	28
4 Experimentální část	30



4.1	Použité přístroje .....	30
4.2	Průběhy měření .....	31
4.2.1	Měření se 14V na zdroji elektrolyzéro .....	32
4.2.2	Měření se 13V na zdroji elektrolyzéro .....	37
4.2.3	Měření s 15V na zdroji elektrolyzéro .....	39
4.2.4	Měření v podtlakovém režimu .....	41
4.2.5	Dynamika výroby kyslíku .....	42
5	Závěr .....	44
	Seznam literatury .....	45
	Seznam obrázků .....	47
	Seznam tabulek .....	47

## Seznam použitých symbolů a zkratek

a	chemická aktivita
AFC	Alkaline Fuel Cell
COM7	USB sériový port
DCFC	Direct Carbon Fuel Cells
E [V]	elektrický elektrodový potenciál
$E^0$ [V]	elektrodový potenciál za standardních podmínek ( $T = 298,15\text{K}$ , $p = 101,3\text{kPa}$ )
F	Faradayova konstanta: $F = 96\,485,339\,9\text{ C/mol}$
GVE	Gibbsova volná energie
$\Delta g_f$	změna Gibbsovy volné energie
$g_f^{\text{prod.}}$	Gibbsova volná energie produktů
$g_f^{\text{reakt.}}$	Gibbsova volná energie reaktantů
I [A]	elektrický proud
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
P [W]	elektrický výkon
$P_o$ [Pa]	atmosférický tlak
$P_x$ [Pa]	parciální tlak daného plynu
PEM	Polymer Electrolyte Membrane nebo také Proton Exchange Membrane
PEM FC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PTFE	polytetrafluoroethylen
R	molární plynová konstanta: $R = 8,314\,472\text{ [J/K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}]$
R [ $\Omega$ ]	elektrický odpor
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell
T [K]	termodynamická teplota
U [V]	elektrické napětí
$U_{\text{akt}}$	úbytek napětí vlivem aktivační polarizace
$U_{\text{ohm}}$	úbytek napětí vlivem ohmické polarizace
$U_{\text{konc}}$	úbytek napětí vlivem koncentrační polarizace
GGO	uzavřený typ elektrody pro měření vzdušného kyslíku
GOO	otevřený typ elektrody pro měření vzdušného kyslíku

## **1 Úvod**

Palivové články jsou sofistikované zdroje, které jsou v současnosti na velice dobré technologické úrovni. Dokážou pracovat téměř s absencí emisí a svojí účinností přesahují v některých případech i 70 %. To jsou některé z důvodů, proč se stále zvyšuje zájem o využití těchto zdrojů. Jejich výkon lze přizpůsobit velmi širokému spektru použití. Ve výkonové elektronice se uplatňují třeba v dopravě nebo v elektrárnách. Je také možné články využít třeba jen v malé přenosné elektronice jako náhrada baterií. S postupným vývojem by se jejich účinnost mohla ještě navýšit. Většímu rozšíření brání několik aspektů. Hlavní je zatím stále vysoká pořizovací cena, která je způsobena drahými materiály a složitostí řídicího systému článků. Dalšími omezujícími kritérii jsou problémy spojené s palivem. Těmi jsou výroba vodíku a pak především jeho uskladnění, což je náročné nejen finančně, ale i energeticky a do značné míry i technologicky.

Cílem této práce je popsat chování palivového článku s polymerním elektrolytem v závislosti na různé koncentraci kyslíku ve vzduchu. Zaměřil jsem se především na sledování difference ve výkonu palivového článku. V úvodní kapitole je přehled druhů palivových článků, dále je detailněji popsán PEM článek a jeho pracovní režimy, ve kterých byl proměřen. V další kapitole je popsán přístroj oxymetr GMH Greisinger 3691, se kterým se podařilo získat velmi důležité poznatky o koncentraci kyslíku v okolí článku. Bylo provedeno několik sad měření, které jsou shrnuty v závěru hodnocení k experimentální části.

## 2 Přehled palivových článků

Tento elektrochemický zdroj přeměňuje chemickou energii přímo na elektrickou. Není potřeba žádného mechanického pohybu a s tím souvisejících přídatných zařízení snižující účinnost, jako je tomu u spalovacích motorů. Postupem doby bylo zkoumáno mnoho druhů článků, z nichž jako nejvhodnější pro použití jsem vybral těchto šest tříd palivových článků.

### 2.1 Druhy palivových článků

Jednotlivé palivové články se liší hlavně podle použitého elektrolytu, který pak určuje jejich provozní teplotu a z toho vyplývající další termodynamické vlastnosti. Ty pak dále ovlivňují a determinují i způsoby jejich efektivního využití.

Vysokoteplotní palivové články mají provozní režim při vysokých teplotách, a to přes 600°C (1100°F). Výhodou je použití jiného paliva než přímo vodíku, protože vysoké teploty umožňují samovolný vnitřní reforming lehkých uhlovodíkových paliv, jako je metan, na vodík a oxid uhličitý za přítomnosti vody.



Další výhodou je, že reakce v těchto palivových člancích probíhají jednoduše a účinně, proto je možné provozovat články bez katalyzátorů z ušlechtilých kovů, jako je například platina. Ta vykazuje výbornou katalytickou účinnost, chemickou odolnost a elektronovou vodivost, ale je velmi finančně nákladná.

Naopak se zvyšující provozní teplotou klesá množství uvolněné energie z elektrochemické reakce a také se objevují některé materiálové poruchy, protože materiály nedokážou odolávat vysokým teplotám po delší dobu bez degradace.

Pro nízkoteplotní články, pracující jen do teploty 250 °C, není vhodný samovolný reforming, a proto potřebují vnější zdroj vodíku. Jejich rozběh je ale rychlejší a provoz méně poruchový.

#### 2.1.1 Palivové články na bázi tekutých uhličitánů (MCFC)

Vysokoteplotní palivové články využívají elektrolytu složeného ze směsi uhličitánu lithia ( $Li_2CO_3$ ) a uhličitánu draselného ( $K_2CO_3$ ) zatavené v matici

z hlinitanu lithia ( $\text{LiAlO}_2$ ). Oproti většině nízkoteplotním palivovým článkům vede tento článek uhličitanové ionty ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) od katody k anodě. Činnost těchto palivových článků probíhá okolo teploty  $650\text{ }^\circ\text{C}$  s tlaky od 1 baru až do 10 barů relativních. Z důvodu vysokých teplot je výhodou samovolný vnitřní reforming lehkých uhlovodíkových paliv, použití katalyzátorů z jiných než ušlechtilých kovů a vysoká kinetika reakce. Nevýhodou je ale nízká životnost. Materiály musí odolávat mechanickému a tepelnému namáhání a korozi. Články jsou dále citlivé na množství síry přivedené v palivovém plynu a na manipulaci s článkem z důvodu tekutého elektrolytu. Plný nájezd do provozního režimu článku na provozní teplotu trvá poměrně značnou dobu. Účinnost se pohybuje okolo 65 %. Odpadním produktem je voda, v případě použití uhlovodíkového paliva ještě oxid uhličitý. [4]

### 2.1.2 Přímé palivové články (DCFC)

Tento palivový článek přeměňuje uhlík přímo na elektrickou energii. Vedlejším produktem je oxid uhličitý, kterého vyprodukuje menší množství než běžné způsoby výroby elektřiny spalováním. Membrána je složena z keramiky, jsou tudíž provozovány při vyšších teplotách ( $600 - 900^\circ\text{C}$ ), při kterých dochází k přímé oxidaci jemných částic uhlíku. Přeměnu popisují rovnice:



Palivem může být uhlí, koks a jiné nezkapalné zdroje uhlíku. Účinnost těchto článků může dosahovat až 80 %. V praxi jsou použity v elektrárně Santa Clara v Kalifornii, USA.



Obrázek 2.1: Elektrárna Santa Clara [4]

### 2.1.3 Palivové články s tuhými oxidy (SOFC)

Vysokoteplotní palivové články využívají neporézní keramický elektrolyt složený z pevných oxidů, obvykle na bázi zirkonia pro jeho čistou aniontovou vodivost ve velkém rozsahu parciálních tlaků  $O_2$ . Články pracují při teplotách okolo  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  s tlakem okolo 1 baru, což přináší výhody možnosti vnitřního reformingu paliva a katalyzátoru z levnějších kovů (např. nikl), než je platina, podobně jako u článku MCFC, ale oproti nim mohou pracovat s vyšší proudovou hustotou. Bezproblémově pracují s palivy v suché i vlhké podobě a stejně jednoduchá je s nimi i manipulace kvůli jejich pevnému elektrolytu. SOFC vykazují velkou účinnost, až 85 % při kogeneraci tepla. Nevýhodou je použití drahých materiálů odolávajících vysokým teplotám a citlivost na vysoký obsah síry v palivu, na který jsou však tolerantnější než MCFC články. Nadbytek síry ale snižuje výkon palivového článku.

### 2.1.4 Alkalické palivové články (AFC)

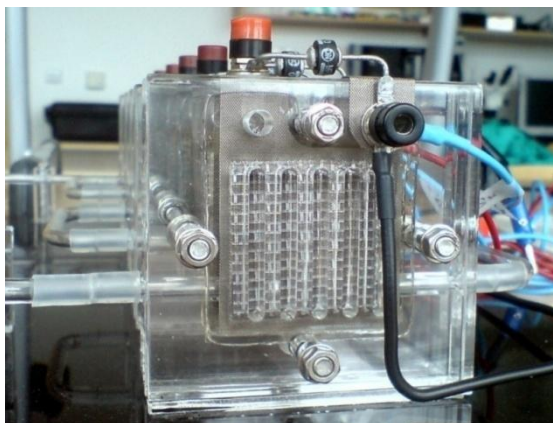
Jedná se o variantu nízkoteplotního palivového článku s elektrolytem složeným obvykle z roztavené směsi hydroxidu draselného (KOH) vedoucího hydroxidové ionty ( $OH^-$ ) od katody k anodě. Ze všech alkalických hydroxidů má KOH nejvyšší vodivost. Možný je jak tekutý alkalický elektrolyt, který se pohybuje mezi elektrodami, tak i pevný elektrolyt udržovaný v porézní krystalické mřížce tvořené například azbestem. Optimální pracovní teplota současných článků je od  $25\text{ }^\circ\text{C}$  do  $250\text{ }^\circ\text{C}$  podle koncentrace elektrolytu. Koncentrovanější elektrolyt (85 % hm. KOH) je vhodný pro články s vyšší provozní teplotou okolo  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , pro nižší teploty ( $80\text{ }^\circ\text{C}$  až  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ) je optimální více ředěný elektrolyt (35 % až 45 % hm. KOH). Účinnost AFC je v rozmezí 60 % až 70 %. Výhodou je potřeba minimálního množství platinového katalyzátoru nebo nahrazení platiny niklem nebo stříbrem. Naopak velká nevýhoda je v omezeném použití okysličovadla a paliva, protože lze použít jen čistý kyslík a čistý vodík. Toto omezení souvisí s přítomností CO nebo  $CO_2$ , který reaguje s hydroxidem draselným na uhličitán draselný a ten zanášením porézní struktury elektrod velmi razantně snižuje životnost článku.

### 2.1.5 Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Nízkoteplotní palivový článek s elektrolytem z kyseliny fosforečné  $H_3PO_4$  (někdy se používá u těchto typů článků kyselina sírová [5]), který je umístěn v krystalické mřížce z karbidu křemíku  $SiC$ , vede vodíkové ionty  $H^+$  od anody ke katodě. Provozní teplota článku je od  $150\text{ }^\circ\text{C}$  do  $250\text{ }^\circ\text{C}$  s tlakem okolo 1 baru. Nejsou citlivé na oxid uhličitý (až do 30 %), takže není potřeba čištění paliva a okysličovadla. Horší je to s obsahem oxidu uhelnatého (asi 2 %) a síry v palivu. Ze skupiny nízkoteplotních článků pracují při nejvyšší provozní teplotě, proto jejich odpadní teplo lze dále využít. Provozní teplota ale není dostatečně vysoká na to, aby byly články schopny samostatného vnitřního reformingu. Při použití uhlovodíkového paliva je systém nutno doplnit o vnější reformér, kde se při teplotě  $800\text{ }^\circ\text{C}$  obohatí palivo (např. metan) vodní párou a za použití katalyzátorů dojde k přeměně podle rovnice 2.1. Při manipulaci je problém s tekutým elektrolytem, ale ve vývoji jsou články s pevnými kyselinovými elektrolyty.

### 2.1.6 Palivové články s polymerní membránou (PEM FC)

Tento nízkoteplotní palivový článek je složený z pevného elektrolytu s polymerní membránou kyselého charakteru, který propouští pouze protony  $H^+$  od anody ke katodě. Nepropouští ani reakční plyny, ani elektrony. Teplotní rozsah článku je mezi  $20\text{ }^\circ\text{C}$  až  $90\text{ }^\circ\text{C}$  a tlaky mezi 1 až 2 bary. Nízké teploty zjednodušují požadavky na použité materiály a umožňují rychlý start. Pevný elektrolyt je výhodný při manipulaci údržbě, jako je doplňování u tekutého elektrolytu a je nekorozivní. Nízká teplota, tlak a pevný elektrolyt zvyšují jeho bezpečnost při provozu. Velikou nevýhodou je cena membrány a platinového katalyzátoru, který je citlivý na obsah oxidu uhelnatého v palivu. Mezi další katalytické jedy patří např. sloučeniny síry a olova. U provozování při vyšších teplotách nad  $100\text{ }^\circ\text{C}$  je problém s vysycháním membrány, to umožní navýšení tlaku z důvodu kapalného stavu vody, ale naopak sníží životnost článku.



Obrázek 2.2: PEM článěk

Jiná varianta PEMFC je DMFC (Direct Metanol Fuel Cells) článěk, který jako palivo využívá metanol. Ten je rozkládán katalyzátorem z ušlechtilého kovu při provozní teplotě 40 – 130 °C dle následující reakce:



Oxidace metanolu je pomalejší, proto se do anodové vrstvy přidává ruthenium k napomáhání další oxidaci uhlíkatých skupin na CO<sub>2</sub>. Použití metanolu je výhodné pro jeho snadnou výrobu, skladování, nízkou výbušnost a vysokou hustotu, ale výkon těchto článků je nízký.

Další variantou paliva by mohla být kyselina mravenčí HCOOH [13], která se na anodové straně rozloží na oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) a vodík (H<sub>2</sub>), nebo také kyselina octová či roztok glukózy [14]. Výhoda v použití kyseliny mravenčí je vysoká proudová hustota a menší složitost chemické reakce, než u použití metanolu. Z důvodu jednoduššího systému je kyselina mravenčí vhodná pro mobilní přístroje. Jednodušší je také skladování a především u glukózy je to snadná dostupnost.

## 2.2 Popis palivového článku s polymerní membránou

Tyto palivové články jsou velmi atraktivním zdroje pro mobilní aplikace, protože jsou schopny velké výkonové hustoty na poměrně malý rozměr a z důvodu nízkých teplot vykazují dynamické vlastnosti a dlouhou životnost. Každý článěk tohoto typu je schopný vygenerovat napětí okolo 1,1 V DC.

První článěk s polymerní membránou byl vytvořen společností General Motors v roce 1963 pro vesmírné účely. Při výkonu 1kW a napětí 25V musel obsahovat



32 článků a pracovat při teplotě 35 °C s čistým vodíkem a kyslíkem za tlaku 140 až 200 kPa.

Komponenty, ze kterých jsou složeny a jsou základem všech palivových článků, jsou elektrody a elektrolyt. Elektrody anoda a katoda přiléhají z obou stran na elektrolyt. Na anodu se přivádí palivo, na katodu okysličovadlo.

Elektrolyt musí splňovat určité požadavky pro správnou funkci. Nejdůležitější je iontová vodivost vodíku ke katodě, kde se sloučí s kyslíkem na vodu, ale nesmí být vodivý pro elektrony z důvodu rozvoje zkratových proudů v článku. Elektrony jsou odváděny vnějším obvodem se zapojenou zátěží. Jelikož je elektrolyt z pevného polymerického okyseleného teflonu (PTFE), jeho schopností je propouštět pouze kladné částice, protony. Obchodní název tohoto elektrolytu je Nafion<sup>®</sup>. Jeho hydrofobní struktura dobře odvádí vzniklou vodu, aby nedošlo k přeplnění membrány vodou.

Problémem je, když membrána začne propouštět vlivem elektroosmotického tlaku z anody na katodu kromě H<sup>+</sup> také částice vody. Dochází pak na anodě k její dehydrataci a špatné funkci vést protony, řešením je např. vlhčení vodíku. Naopak na katodě je vody dostatek, za určitých podmínek by mohlo dojít k zaplavení elektrody. [7]

### 2.2.1 Princip činnosti

Princip PEM článku je jednoduchý, jak už bylo zmíněno, reaguje zde vodík s kyslíkem. Za pomoci katalyzátoru ze vzácných kovů (zpravidla paladium nebo platina), který umožňuje reakci štěpení na elektrodách, vzniká voda. Katalyzátor podporuje a urychluje průběh reakce, ale není během této reakce spotřebován. Na straně anody se vodík začne rozkládat na kationty vodíku H<sup>+</sup> a elektrony e<sup>-</sup>, reakce je pak popsána rovnicí:

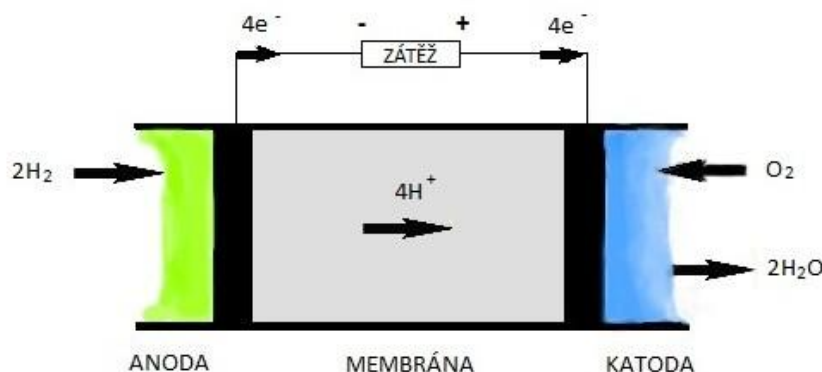


Kationty H<sup>+</sup> projdou elektrolytem a vzájemnou přitažlivostí reagují s kyslíkem. Po vykonání práce elektrony ve vnějším elektrickém obvodu se pak přidají také do reakce. Na katodě pak proběhne rovnice:



Celková reakce pak vypadá takto:





Obrázek 2.3: Princip činnosti PEM článku

## 2.3 Provozní stavy

Palivový článek byl měřen ve třech provozních režimech, které byly převzaty z předchozích zkušebních pokusů a v jednom novém režimu. První režim realizovaný při normální atmosférické koncentraci kyslíku, která byla v laboratoři, byl pracovně nazván atmosférický režim. Druhý režim byl s položeným neutěsněným krytem, do kterého byl přiváděn kyslík, tzv. kyslíkový režim, a ve třetím režimu se měřilo s téměř uzavřeným kyslíkovým krytem, ve kterém mohlo dojít k velmi mírnému nárůstu přetlaku, ale pouze zanedbatelného, tzv. tlakový režim. Čtvrtý režim, který byl realizovaný, měl utěsněný kryt bez přístupu kyslíku, tedy menší parciální tlak kyslíku než je v atmosféře. Ten byl pracovně označen jako podtlakový režim.

### 2.3.1 Atmosférický režim

Je to standardní režim bez jakéhokoli pomocného zařízení, tzn. při atmosférickém tlaku 977 hPa, koncentraci kyslíku 20,9 %, parciálním tlaku kyslíku 204 hPa a teplotě okolo 22 °C. Tento režim je využit vždy při zahájení funkce palivového článku, aby došlo ke správnému zaplynování článků vodíkem a najetí do provozních hodnot na standardní zátěži, a také před ukončením činnosti z důvodu postupné stabilizace termodynamických projevů předchozích experimentů.

### 2.3.2 Kyslíkový režim

Při tomto režimu je již využito zařízení, které bylo nazváno kyslíkový kryt, aby do něho byl přiváděn kyslík vyrobený elektrolýzou a mohlo se v něm dosáhnout větší

koncentrace, než je ho v atmosféře. Rozměry krytu v centimetrech jsou 38 x 18,4 x 10,5, tudíž celkový objem krytu je 7,5 dm<sup>3</sup>.



**Obrázek 2.4:** Kyslíkový kryt

Kryt je přes články v tomto režimu jen volně položen, takže koncentraci kyslíku lze zvyšovat jen do omezené hodnoty, protože dochází vlivem netěsnosti k velké interakci s okolním vzduchem, ale již v tomto režimu lze sledovat mírné změny v navýšení výkonu.

Změnou parciálního tlaku se kyslík i vodík dostane snáze ke kontaktu s katalytickou vrstvou elektrod a dojde k urychlení reakce. Také se tímto změní hodnota GVE, Gibbsovy volné energie.

### 2.3.3 Tlakový režim

Tento režim je v principu shodný s režimem kyslíkovým, jen došlo ke stanovení několika pravidel k zatěsnění krytu. To bylo prováděno pomocí lepicí pásky v místech, kde by mohlo dojít k úniku kyslíku do okolí, tzn. u všech otvorů v krytu a došlo také k přilepení krytu k desce pro PEM články. Zatěsnění se ale neprovádělo úplně (např. otvor na přívod kabelů nebyl zalepen vzduchotěsně), aby nedošlo k celkovému navýšení tlaku oproti tlaku atmosférickému. Koncentrace kyslíku pak dosáhne vyšší hodnoty než u předchozího režimu, tudíž i většího výkonu, protože při zvýšeném parciálním tlaku kyslíku vstoupí do reakce i více vodíku, kterého je elektrolyzérem vyroben nadbytek.

### 2.3.4 Podtlakový režim

V tomto režimu je opět použit kyslíkový kryt, ale s tím rozdílem, že se maximálně zamezí přístupu kyslíku do krytu, tudíž se lepicí páskou zalepí i otvor pro přívod kyslíku od elektrolyzéro. Měření začne, když je koncentrace kyslíku shodná

s okolním vzduchem, tedy 20,9 %. Koncentrace, tedy i parciální tlak kyslíku, se postupně při chodu PEM článku sníží a dojde k omezení výkonu, protože naopak od tlakového režimu se reakce snížením koncentrace zpomalí.

### 2.3.5 Nájezdový režim

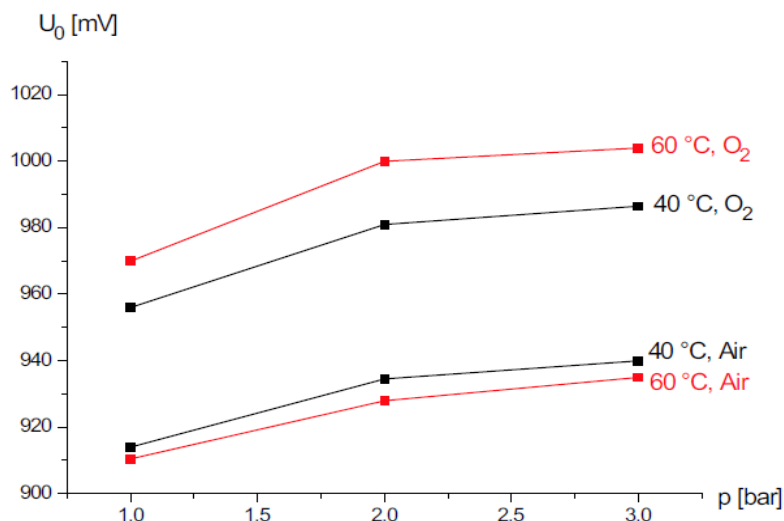
Tento režim není určen pro měření, ale jen pro provozně optimální stav membrán a stabilizaci napětí. Po spuštění zdroje elektrolyzáru se na elektrody začne přivádět vodík, ze sloupcového zvlhčovače dojde k mechanicky aktivovanému zavodnění článku, tzn. k hydrataci membrány pro její správnou funkci, a přebytečná voda je z článku vytlačena zpět do zásobníku palivové vody. Článek začne postupně najíždět do provozního režimu. Nejprve se chová jako měkký zdroj, protože má velký úbytek napětí při zatížení. Není tedy schopen udržet standardní zátěž. Ale do několika minut se změní v tvrdší zdroj, protože se zmenší úbytek napětí při zatížení a také se sníží jeho vnitřní odpor. Má tedy stálý výkon a standardní zátěž udrží v chodu bez problémů. Doba nájezdu je závislá na mnoha faktorech, především však na délce odstavení palivového článku a tudíž na vysušení membrány, které pak trvá delší dobu se zregenerovat opětovným zaplavením. Dlouhodobé vysušení může vést až k degradaci membrány a jejího znehodnocení, třeba vlivem mechanického tlaku.

## 2.4 Vliv tlaků jednotlivých plynných složek na membránu

Palivový článek pracuje běžně při atmosférickém tlaku. Začnou-li se mu dodávat reakční plyny při zvýšeném tlaku, dojde k navýšení výkonu, protože se zvýší rychlost elektrochemické reakce. Zvýšený tlak jednoduše tlačí vodík a kyslík do místa kontaktu s elektrolytem. Působení tlaku se více projevuje při vyšších proudcích. Nejvíce se nárůst tlaku projevuje při užití čistého paliva a okysličovačla, protože nevznikají přídavné ztráty na nereagujících plynech. Zvýšením provozního tlaku se tedy obvykle zvýší napětí a hustota energie. Velkou výhodou zvýšeného tlaku je také možnost navýšení provozní teploty PEM článku, protože se zvýší bod varu vody.

Navýšení tlaku má i negativa, jedním je pokles celkové účinnosti celého systému článku. K vytvoření tlaku je totiž potřeba přídavné komprese vzduchu, která má výrazný odběr vyrobené energie. Ke snížení účinnosti vede skutečnost, že bipolární desky PEM článku pracují lépe při menším tlaku. Navýšení tlaku má také vliv na těsnění PEM

článků a dalších součástí, proto dojde ke zvýšení rozměrů a ceny z důvodu přestavby systému. Palivové články se tudíž používají pouze při zvýšeném tlaku několik atmosfér[5]. Zajímavé je porovnat použití čistého okysličovadla (pouze kyslík) s méně koncentrovaným okysličovadlem (vzduch).



**Obrázek 2.5:** Experimentální závislost tlaku na klidovém napětí pro různou teplotu a katalyzátor [8]

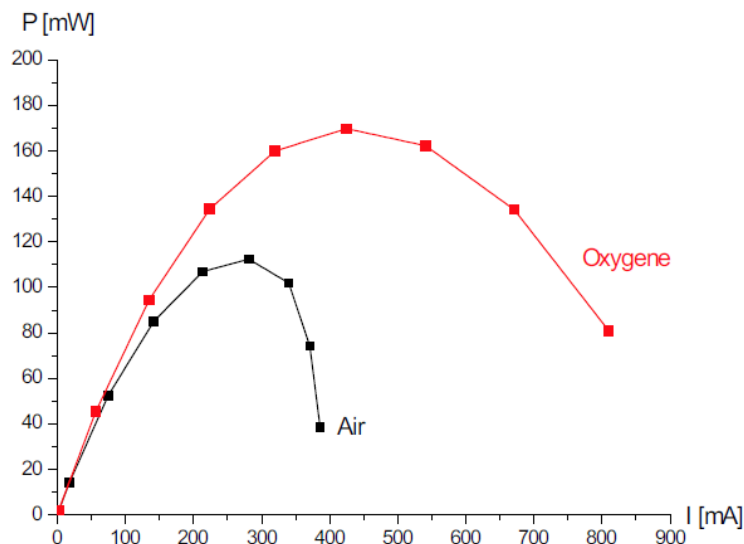
#### 2.4.1 Vzduch v systému PEM článků

Z praktického hlediska je to nejpoužívanější okysličovadlo, protože není potřeba v systému žádného přídavného zařízení pro jeho uchování. Nevýhodou je nízká koncentrace kyslíku, která je ve vzduchu pouze 20,9 % z celkového objemu. Vlivem této skutečnosti do reakce vstupují kromě kyslíku také inertní plyny. Ty pak způsobují výkonové ztráty, především při větším proudu, protože je na katodě nedostatek reaktantů. Pouze při malém proudu je vzduch jako okysličovadlo srovnatelný s čistým kyslíkem, což potvrzuje obrázek 2.3. Při použití vzduchu místo kyslíku u pohonů v dopravě se sníží proudová hustota až o 50 %. [9]

#### 2.4.2 Kyslík v systému PEM článků

Systémy těchto palivových článků jsou většinou konstruovány pro provoz v uzavřeném prostředí jako samostatná nezávislá soustava. Kyslík je pak skladován jako stlačený plyn nebo jako kryogenní tekutina (tzn. kapalina při extrémně nízké teplotě, cca pod 200 K). Palivové články vykazují větší výkon a celkově větší účinnost, protože nejsou přítomny jiné plyny, které jsou obsaženy ve vzduchu (dusík, oxid uhličitý...)

a které by způsobovaly přídavné ztráty fyzikálně chemického charakteru. Použitím čistého kyslíku také dojde k účinnějšímu využití katalyzátorů. Z grafu je pak vidět, že při větších proudech má článěk dostatek reaktantů a dojde tak k většímu využití paliva.



**Obrázek 2.6:** Vliv okysličovadla na výkon článku (při teplotě 60 °C a tlaku 3 bary). [8]

## 2.5 Gibbsova volná energie

Jiné označení pro tuto energii je „dostupná energie pro konání vnější práce, zanedbávající jakoukoliv práci konanou změnami tlaku a/nebo objemu.“ Jednoduše vyjadřuje energetické využití reaktantů. Změnu Gibbsovy volné energie  $\Delta g_f$  lze snadno vyjádřit rovnicí:

$$\Delta g_f = g_{f \text{ prod}} - g_{f \text{ reakt}} = g_{f \text{ H}_2\text{O}} - g_{f \text{ H}_2} - \frac{1}{2} g_{f \text{ O}_2} \quad (2.9)$$

**Tabulka 2.1:** Hodnoty  $\Delta g_f$  pro uvedenou reakci 2.9 při různé teplotě

Forma produktové vody	Teplota	$\Delta \bar{g}_f$
	(°C)	(kJ mol <sup>-1</sup> )
Kapalná	25	-237,2
Kapalná	80	-228,2
Plynná	80	-226,1
Plynná	100	-225,2
Plynná	200	-220,4
Plynná	400	-210,3
Plynná	600	-199,6
Plynná	800	-188,6
Plynná	1000	-177,4

Pro výpočet elektromotorického napětí vodíkového palivového článku využijeme vzorce pro vykonanou elektrickou práci  $A$ , která je potřebná pro pohyb 1 molu elektronů podél elektrického obvodu:

$$A = Q \cdot U = -zF \cdot E \quad (2.10)$$

$Q$  je elektrický náboj,  $U$  je elektrické napětí,  $F$  je Faradayova konstanta, která určuje náboj na jednom molu elektronů, a  $E$  je elektrický potenciál.

Za předpokladu celkové přeměny chemické energie na elektrickou vyjádříme ze vzorce 2.10 jiný, ze kterého pro palivový článek, pracující při 200 °C, vypočítáme napětí 1,14 V. Článek je vodíkový, proto z důvodu počtu elektronů procházejících elektrickým obvodem  $z = 2$ .

$$E = \frac{\Delta g_f}{z \cdot F} = \frac{220 \text{ kJ/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ C/mol}} = 1,14 \text{ V} \quad (2.11)$$

Za předpokladu různé koncentrace a tlaku reaktantů využijeme k výpočtu Nernstovy rovnice. Nejprve je nutné si určit aktivitu reaktantů  $a$ :

$$a = \frac{P}{P_0} \quad (2.12)$$

Po vypočtení aktivity jednotlivých reaktantů dosadíme tyto hodnoty do Nernstovy rovnice (zjednodušení za předpokladu, že tlaky jsou zadané v barech a  $P_0=1$ ), kde  $E^0$  je vratný potenciál, který udává elektromotorickou sílu v chodu naprázdno,  $R$  je molární plynová konstanta a  $T$  je teplota.

$$E = E^0 + \frac{R \cdot T}{2F} \cdot \ln \left( \frac{a_{H_2}^1 \cdot a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}^1} \right) = E^0 + \frac{R \cdot T}{2F} \cdot \ln \left( \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (2.13)$$

Pokud bude systémový tlak  $P$  stejný na anodě i katodě, můžeme si vyjádřit jednotlivé tlaky reaktantů a produktů takto:

$$P_{H_2} = \alpha \cdot P \quad (2.14)$$

$$P_{O_2} = \beta \cdot P \quad (2.15)$$

$$P_{H_2O} = \delta \cdot P \quad (2.16)$$

Znaky  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\delta$  jsou konstanty závislé na molárním množství a koncentraci  $H_2$ ,  $O_2$  a  $H_2O$ .

Potom můžeme rovnici 2.13 upravit:

$$E = E^0 + \frac{R \cdot T}{2F} \ln \left( \frac{\alpha \cdot \beta^{1/2}}{\delta} \cdot P^{1/2} \right) = E^0 + \frac{R \cdot T}{2F} \ln \left( \frac{\alpha \cdot \beta^{1/2}}{\delta} \right) + \frac{R \cdot T}{4F} \ln(P) \quad (2.17)$$

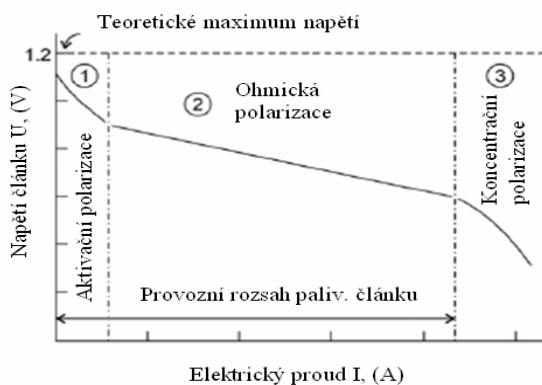
Změní-li se okysličovadlo ze vzduchu na čistý kyslík, můžeme snadno určit diferenci napětí:

$$\Delta U = \frac{R \cdot T}{4F} \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{R \cdot 353,15}{4 \cdot F} \cdot \ln \frac{1}{0,21} = 0,012 \text{ V} \quad (2.18)$$

Při provozní teplotě 80 °C se tedy změní o 0,012 V podle výpočtu. Ve skutečnosti bude diference napětí ještě vyšší. [5]

## 2.6 Polarizace

Ztráty způsobené chemickými a fyzikálními vlivy, které způsobují odlišnost vypočteného napětí na palivovém článku od naměřeného napětí. Toto napětí článku se snižuje se zvyšujícím proudem, který protéká obvodem, podle obrázku 2.6.



Obrázek 2.7: Polarizační ztráty (aktivační, ohmická, koncentrační) [5]

### 2.6.1 Aktivační polarizace

Aktivační polarizace představuje ztráty, které se projevují při počátku reakce z důvodu její pomalé kinetiky. Jsou ovlivněny vlivem katalyzátorů, aktivitou reaktantů a strukturou elektrod.

### 2.6.2 Ohmická polarizace

Ohmická polarizace je způsobena elektrickým odporem v elektrodách a jejím dalším propojením, které ovlivňují elektrony a odporem ovlivňující ionty při průchodu přes elektrolyt. Průběh ztrát je přibližně lineární a nazývá se také odporové ztráty. Ty lze snadno vypočítat pomocí Ohmova zákona.



### 2.6.3 Koncentrační polarizace

Koncentrace reaktantů, které jsou přivedené na povrch elektrod, vyvolávají koncentrační polarizaci. Tyto ztráty se projevují při větším proudovém zatížení, protože dochází k rychlejší spotřebě reaktantů a její pomalejší dodávce. Průběh reakce je pak zpomalen. Z důvodu narušení dodávky reaktantů se tyto ztráty také jinak nazývají ztráty způsobené přepravou hmoty.

Skutečné napětí se vypočítá podle rovnice 2.19.

$$U_{\text{celk}} = E^0 - U_{\text{akt}} - U_{\text{ohm}} - U_{\text{konc}} \quad (2.19)$$

### 3 Možnosti přístroje GMH 3691

Digitální měřicí přístroj GMH 3691 byl pořízen pro sledování koncentrace kyslíku [vol. %] zachyceného do kyslíkového krytu. Může také snímat parciální tlak kyslíku [hPa nebo mmHg] a teplotu [°C nebo °F]. Při poškození přístroje anebo při překročení odchylky od rozsahu upozorní uživatele na tuto skutečnost funkce „alarm.“ S pomocí funkce „hold“ je možné zastavit aktuálně měřené hodnoty. Pro ukládání maximální i minimální hodnoty slouží paměť.



Obrázek 3.1: Přístroj oxymetr s USB kabelem

#### 3.1 Obsluha přístroje

Koncentrace vyjádřená jako parciální tlak kyslíku se zobrazuje na hlavním displeji a přepíná se tlačítkem pro nastavení (SET/MENU). Parciální tlak je částečnou dílčí složkou z celkového souboru plynů a par podílejících se na celkovém tlaku. Daltonův zákon zní, že součet parciálních tlaků všech složek směsi je roven celkovému tlaku směsi. Matematicky je vyjádřen takto:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_k = \sum p_i \quad (2.20)$$

Ve skutečnosti nejde o zákon, ale pouze o podmínku ideálnosti plynné směsi.

V ovzduší se parciální tlak pohybuje okolo 21 kPa ( $100 \cdot 0,21 = 21$ ), k tomu lze jednoduše dojít vynásobením celkového tlaku s podílem daného plynu, který je v celkovém tlaku obsažen (kyslík tvoří 21 %). Aby byl parciální tlak u kyslíku

bezpečný, tak by neměl být nižší než 16 kPa. V opačném případě hrozí riziko hypoxie (udušení). Při tlaku nad 50 kPa po dobu 16 hodin dochází k poškození plic. Koncentrace je podíl daného plynu vyjádřený v procentech, ten tvoří u kyslíku 21 %. Jelikož je kyslík velmi reaktivní plyn, již mírně zvýšená koncentrace 23,5 % je nebezpečná z důvodu vzniku požárů, ale pod 13 % se ani běžná paliva nevznítí [3]. Přístroj zobrazuje parciální tlak v hPa, z kPa lze tedy snadno převést,  $1 \text{ kPa} = 10 \text{ hPa}$ .

Na vedlejší displeji je zobrazena teplota. Před zahájením měření musí být teplota měřeného plynu i teplota elektrody shodná, teplotní rozdíl by zapříčinil odchylku v měření. Doba vyrovnání teplot se vzhledem ke konstrukci může pohybovat od několika minut do několika hodin, ale dobu lze zkrátit cirkulací měřeného plynu.

Před každým měřením nebo kalibrací je nutno zkontrolovat nastavenou hodnotu tlaku vzduchu a popřípadě tuto hodnotu změnit pro dosažení přesných výsledků měření. Při změně tlaku vzduchu o 10 % dojde k chybě měření o 10 %!

Změny atmosférického tlaku a stárnutí senzoru kyslíku způsobují navyšování chyby během měření, proto je nutné přístroj kalibrovat každých 7 dní nebo před každým měřením. Provádí se buď jednobodová kalibrace, kdy si elektroda nastaví obsah kyslíku automaticky (20,95 %), nebo dvoubodová kalibrace, kdy je obsah kyslíku ve vzduchu automaticky nastaven pouze na jedné elektrodě a na jiné lze nastavit volitelnou hodnotu.

Teplotní kompenzace je automatická pomocí teplotního senzoru zabudovaného v pouzdře senzoru kyslíku. Kompenzaci odchylky snímače teploty lze nastavit nulovým bodem (offset). Když je jiný než nulový, tak jeho hodnota bude krátce zobrazena na displeji při zapnutí přístroje.

S počítačem se dá přístroj propojit sériovým rozhraním přes komunikační konvertor GRS 3100 nebo GRS 3105 společně s programem EBS 20 M nebo GSOFT. Datový přenos je chráněn proti rušení. Při připojení více přístrojů na jedno rozhraní počítače je nutné, aby každé zařízení mělo přiděleno různé adresy.

Přístroj je možné napájet jak z externího zdroje stejnosměrným napětím mezi 10,5 až 12 V, tak z baterie s 9 V, typ IEC6F22. Mezi další funkce přístroje patří kontrola stavu baterie a automatické vypnutí, které lze nastavit od 1 minuty do 120 minut.

### 3.2 Elektroda GGO 370

Elektroda GGO 370 je sonda, která je vhodná pro přetlak a podtlak v uzavřených prostorech, do kterých se připevní plynotěsně pomocí zavítu, kterým je osazena, nebo pomocí hadicového adaptéru. Proto byla zvolena jako vhodná pro měření koncentrace v kyslíkovém krytu.



Obrázek 3.2: Sonda GGO 370 upevněná v krytu

Jinou variantou elektrody je GOO (otevřené provedení) pro plyny procházející elektrodou, tudíž nedochází k tlakovým rozdílům měřeného plynu kolem senzoru, rychle se kompenzuje teplota a minimalizuje se chyba měření. Její využití je například pro měření plynů na výstupu z tlakových lahví, ale nesmí být překročen maximální provozní tlak elektrody.

### 3.3 GSOFT 3050

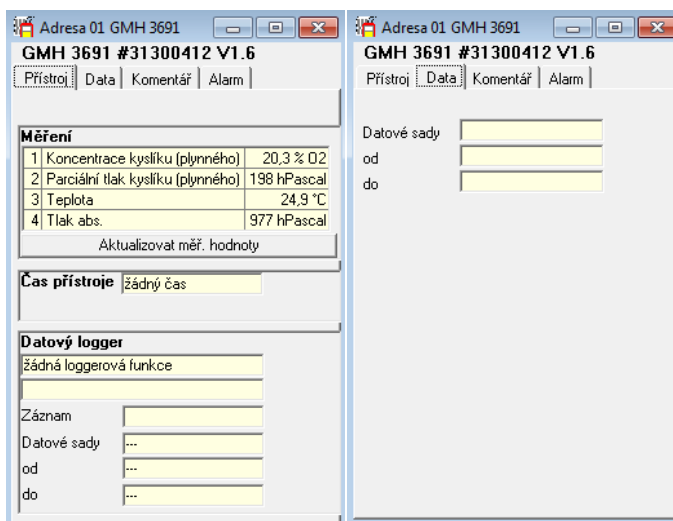
Software umožňující obsluhu ručních měřicích přístrojů s loggerovou funkcí řady GMH3xxx, díky tomu lze tedy zobrazit stav přístrojů GMH, nastavení poplachové funkce přístrojů GMH3xxx a GMH5xxx, obsluhovat logovací funkci (tzn. spustit a zastavit záznam, nastavit délku záznamového intervalu a načtení naměřených dat), graficky zobrazit naměřená data do grafu, uložit data do samostatných datových souborů, vytisknout ve formě tabulky nebo diagramu a uložit uživatelské prostředí dle osobních potřeb.

Software podporuje tři jazykové verze (angličtina/němčina/čeština) a pracuje pod systémy Windows 98, Me, NT, 2000, XP, Vista a 7.

### 3.4 Realizace spojení přístroje GMH 3691 s PC

Nejprve bylo zapotřebí nainstalování ovladačů k USB Serial Converter a USB Serial Port (COM7) do PC. Poté došlo k instalaci již zmíněného programu GSOFT,

kteřý byl následně na to spuštěn. Přístroj GMH3691 byl připojen přes sériové rozhraní. Aby byl načten do počítače, tak je nejprve nutné nastavit adresu sériového interface (COM7). Pokud bychom chtěli připojit více měřících přístrojů, museli bychom nastavit ještě různé základní adresy na každém z nich. Načtený přístroj je nutné potvrdit, následně se zobrazí tabulka s aktuálními hodnotami, které jsou zobrazené na jeho displeji.

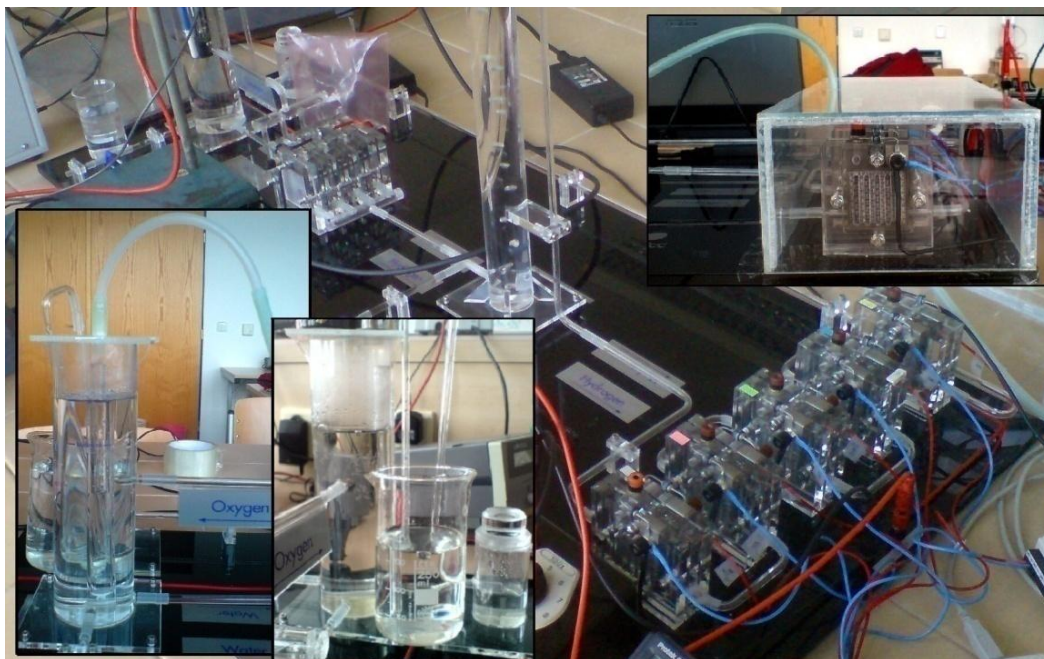


Obrázek 3.3: Tabulky zobrazené v programu GSOFT

Měření však nešlo více zautomatizovat, jelikož software nenalezl v přístroji loggerovu funkci a stejně tak ani čas přístroje. Tyto funkce jsou zjevně navázány na nějaký HW doplněk, který ale nebyl v dodávce přístroje explicitně specifikován. Proto nebylo umožněno automatizované zapisování a ukládání dat. Tento problém se nepodařilo vyřešit ani po konzultaci s vedoucí obchodu, kde byl přístroj se softwarem zakoupen.

## 4 Experimentální část

Experimentální část spočívala v měření palivového článku v již zmíněných provozních režimech a v zaznamenání jejich vlivu na výkon PEM článku. Dalším úkolem bylo zjistit dynamiku zásobování kyslíkového krytu PEM článků kyslíkem a původní objemové náplně za novou s vyšší koncentrací kyslíku.



**Obrázek 4.1:** Na velkém obrázku je zobrazen komplex StaXX Exhibition, na těch menších je zachycena úprava jednotlivých částí na tlakový režim

### 4.1 Použité přístroje

Měření se provádělo na komplexu StaXX Exhibition 3050 od firmy H-TEC, který je tvořen zásobníkem palivové vody, elektrolyzérem, sloupcovým zvlhčovačem vodíkového paliva a 5 dvou-membránových palivových článků spojených sériově za sebou. Celý komplex je propojen pomocí skleněných trubiček.

Zátěž byla simulována pomocí ventilátoru vzduchu ve tvaru květiny, který byl pracovně označen jako standardní zátěž. Ta byla použita především po spuštění v nájezdovém režimu a při měření nárůstu nebo poklesu koncentrace kyslíku v kyslíkovém krytu. Druhou zátěží, která byla při experimentech použita, byla odporová dekáda, kterou byla měřena závislost výkonu na jednotlivých zátěžích. Abychom měřili na zátěžích okolo výkonové špičky, bylo provedeno několik průběhů a jako optimální

byly zvoleny zátěže na dekádě od 200 ohmů do zkratu, ve kterém se nesmí palivový článek dlouho nechávat, maximálně asi 5 sekund.



**Obrázek 4.2:** Použité zátěže - vlevo odporová dekáda, vpravo standardní zátěž

Ke snímání okolních veličin byly použity dva digitální multimetry (ampérmetr a voltmetr), digitální barometr, notebook se softwarem LabView a oxymetr, jehož sonda musela být upevněna do kyslíkového krytu. Umístění bylo zvoleno co nejdál od přívodu kyslíku, aby co nejméně ovlivňovalo naměřené hodnoty. Během prvního měření byl použit ještě pH metr a konduktometr. Všechny přístroje s bližším popisem jsou uvedeny v tabulce 4.1.

**Tabulka 4.1:** Použité přístroje

Měřená veličina	Měřicí přístroj	Výrobce
U[V]	notebook HP + software LabView + sběrnice dat NI USB-6008 ; digitální multimetr M-3660D	National Instruments; Metex
I[A]	digitální multimetr PROTEK HC-506	Protek
koncentrace O <sub>2</sub> [%], teplota t[°C]	digitální oxymetr GMH 3691	Greisinger electronic
tlak P[Pa]	digitální barometr GTD 1100	Greisinger electronic
konduktivita $\gamma$ [S/m]	laboratorní konduktometr WTW inoLab Cond 730	InoLab
pH palivové vody	pH metr PHI 04	Lavat

## 4.2 Průběhy měření

Před započítím samotného měření byla stanovena experimentální pravidla, aby bylo možné jednotlivé naměřené údaje porovnávat. Vždy se začínalo s tzv. nájezdovým

režimem (podkapitola 2.3.4) se standardní zátěží pro správný rozjezd článku. Jakmile byl článěk schopen udržet bez problémů standardní zátěž, připojila se odporová dekáda. Aby doby mezi jednotlivými hodnotami odporů byly stejné, tak jako optimální doba byla použita jedna minuta. Měřené veličiny se tímto způsobem ustálily.

#### 4.2.1 Měření se 14 V na zdroji elektrolyzáru

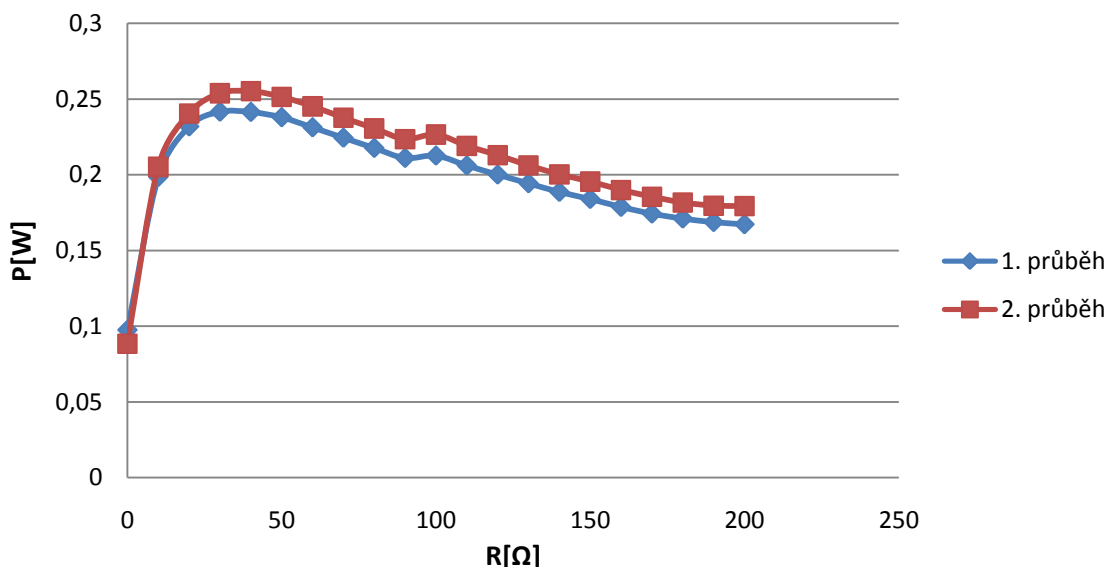
První měření bylo zahájeno proměřením článku v atmosférickém režimu s napětím na zdroji elektrolyzáru 14 V. Nájezd na provozní zátěž byl velmi rychlý. Do zásobníku palivové vody pak byly upevněny elektrody na měření pH a vodivosti tak, aby nepřekážely během provozu. Pomocí sondy na měření vodivosti byla měřena i teplota. Naměřené hodnoty se zásadním způsobem neměnily, proto jsou zde uvedeny pouze vybrané hodnoty.

**Tabulka 4.2:** pH a konduktivita vody

Měřená veličina	Začátek měření	V průběhu měření	Konec měření
pH vody	4,005	4,014	4,023
$\gamma$ vody	110,2	112,8	114
teplota vody	21,6	22,3	23,5

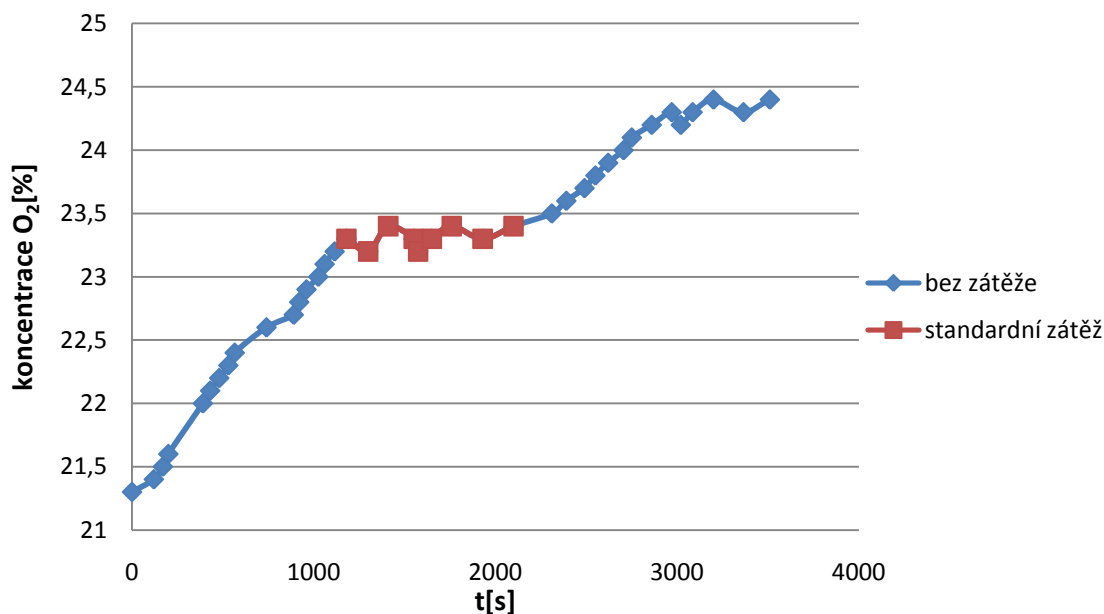
Hodnoty pH se změnilo mírně na zásadité a vodivost také mírně vzrostla, ale jak již bylo uvedeno, pouze zanedbatelně. Taktéž se zvýšila teplota vody, ta byla způsobena ohřevem PEM článků. Takto došlo i k navýšení výkonu během jednotlivými cykly měření, což je vidět na grafu.





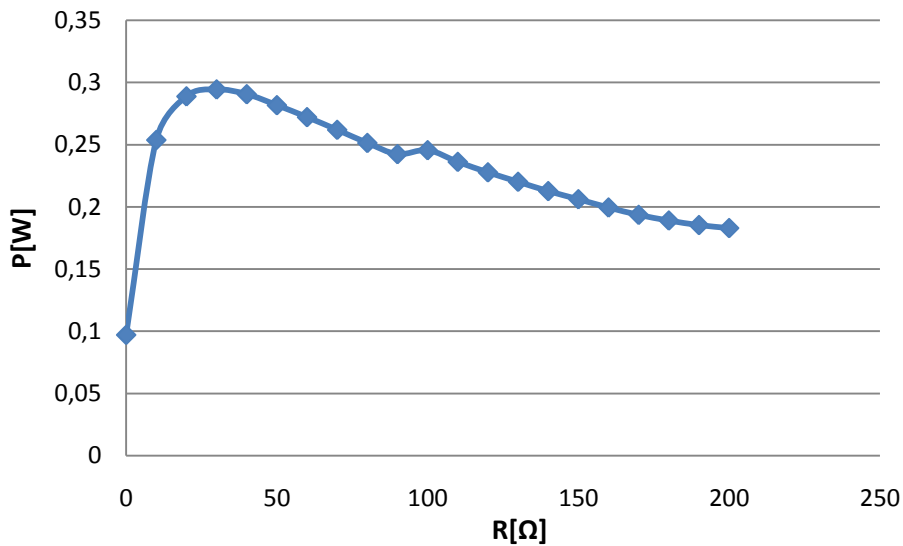
Obrázek 4.3: Výkonová charakteristika

Pokles výkonu je plynulý, mírný skok na hodnotě 100  $\Omega$  je způsoben přepnutím rozsahu na odporové dekádě. Druhé měření PEM článku se provádělo s položeným kyslíkovým krytem, tzv. kyslíkový režim. Nejprve se muselo počkat, než se koncentrace kyslíku v krytu zvýší. Aby navyšování koncentrace bylo co nejrychlejší, provádělo se toto měření bez zátěže s rozpojenými svorkami.

Obrázek 4.4: Nárůst koncentrace O<sub>2</sub> v kyslíkovém režimu

Nárůst koncentrace O<sub>2</sub> byl téměř lineární až do připojení standardní zátěže, kdy se zastavil a stagnoval na konstantní hodnotě. Po odpojení standardní zátěže došlo opět k lineárnímu nárůstu, který se zastavil na hodnotě blízké 24,5 %, okolo které už jen

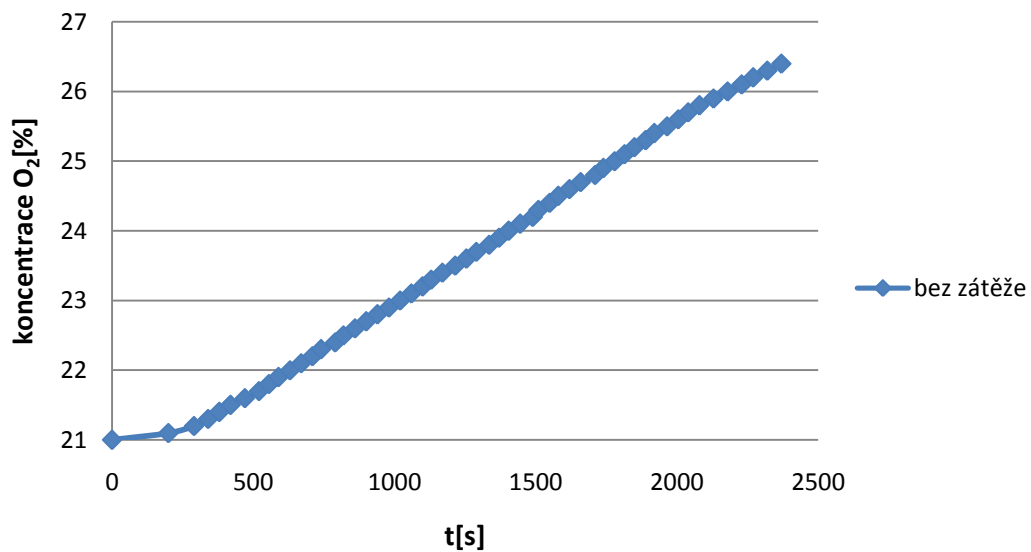
kolísal. Jako zátěž se tedy připojila odporová dekáda a přešlo se k proměření výkonové charakteristiky.



**Obrázek 4.5:** Výkonová charakteristika v kyslíkovém režimu

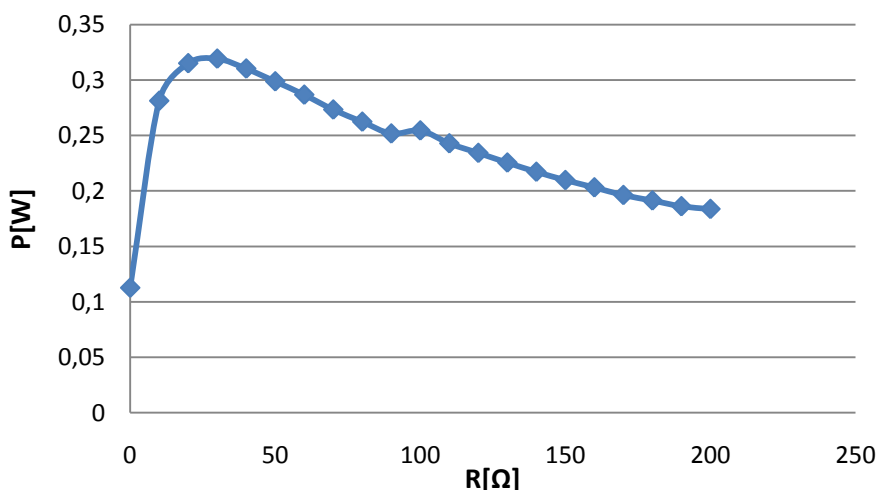
Již při malém navýšení koncentrace kyslíku v kyslíkovém krytu je vidět skok v nárůstu výkonu. Srovnání výkonů v jednotlivých režimech je vyhodnoceno v závěrečné části práce.

Nakonec zbývalo přejít k tlakovému režimu. Nejdřív tedy došlo k vyrovnání vzduchu s okolní atmosférou a poté k utěsnění většiny otvorů v krytu. Nárůst koncentrace  $O_2$  byl v tomto režimu mnohem rychlejší a plynulejší než u kyslíkového.



**Obrázek 4.6:** Nárůst koncentrace  $O_2$  v tlakovém režimu

Průběh byl téměř lineární, jen z počátku se blížil parabolickému, dokud nedošlo k protlačení kyslíku do kyslíkového krytu přes systém přívodu od elektrolyzéro. Po dosažení koncentrace  $O_2$  26,5 % došlo k připojení odporové dekády a proměření výkonové charakteristiky.



**Obrázek 4.7:** Nárůst koncentrace  $O_2$  v tlakovém režimu

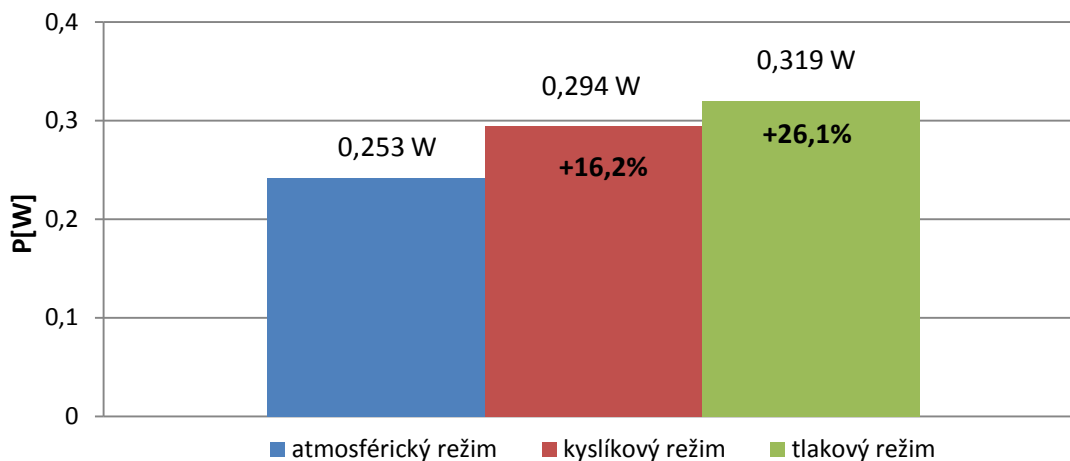
S nárůstem koncentrace  $O_2$  na 27,7 % došlo k navýšení výkonu, který překročil 0,3 W. Hodnoty pH a vodivosti už nebylo možné sledovat nepřetržitě z důvodu úpravy zásobníku palivové vody na kyslíkový nebo tlakový režim, proto byly odebrány hodnoty palivové vody pouze před úpravou zásobníku a po skončení celkového měření v tlakovém režimu. Přebytečný vodík, který není články spotřebován, není veden zpět do zásobníku palivové vody, ale do pomocné nádoby s podobnými vlastnostmi a objemem vody, která je v zásobníku. Jelikož oběh palivové vody z důvodu úpravy již nebyl propojený, musela být voda před začátkem měření v tlakovém režimu v obou nádobách řádně promíchána, aby bylo možné na konci měření výsledky v obou nádobách porovnat.

**Tabulka 4.3:** pH a konduktivita vody v tlakovém režimu

	pH v zásobníku palivové vody	pH v pomocné nádobě	$\gamma$ v zásobníku palivové vody	$\gamma$ v pomocné nádobě
Začátek	4,017	4,017	94	94
Konec	4,021	4,021	100,5	89,5

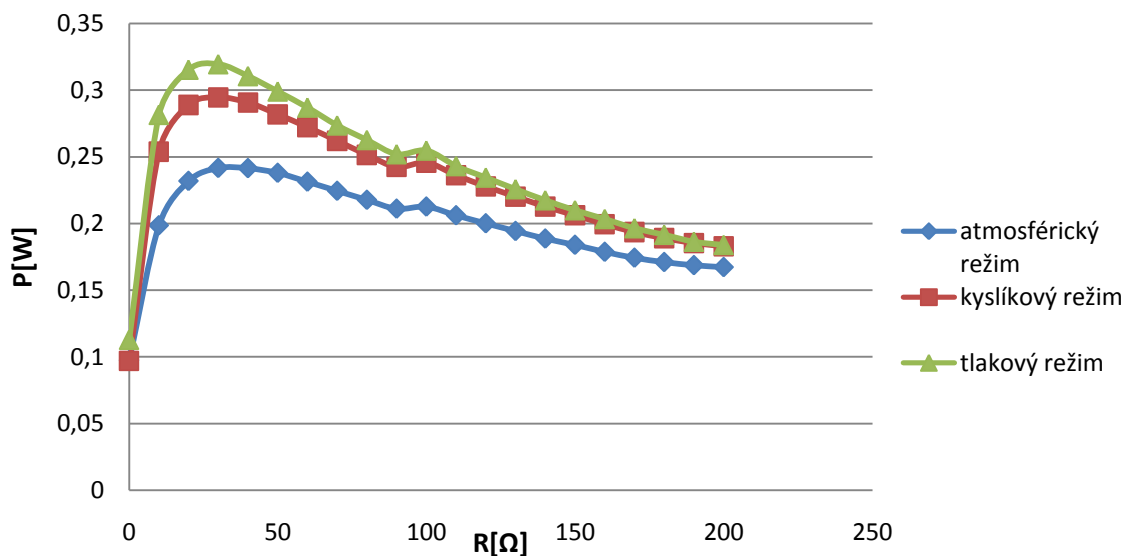
Hodnoty pH se prakticky nezměnily, ke změně došlo jen u vodivosti. V zásobníku palivové vody se vodivost mírně navýšila, zřejmě vlivem vracejícího se

kyslíku z elektrolyzátoru. Naopak v pomocné nádobě, do které se vrací přebytečný vodík od PEM článků, se vodivost snížila. Hodnoty pH a vodivosti dopadly i u dalších měření podobně, proto v práci již nejsou dále uváděny.



**Obrázek 4.8:** Srovnání výkonových maxim v jednotlivých režimech

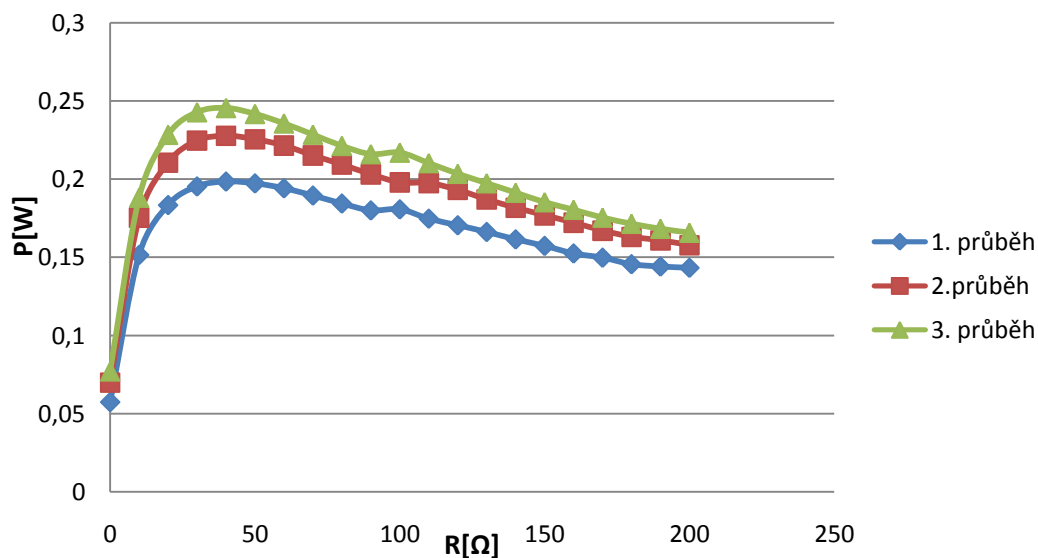
Na obrázku 4.8 je zobrazen postupný nárůst výkonu během jednotlivých režimů. Zobrazené hodnoty jsou nejvyšší dosažené výkony, kterých články dosahovaly při hodnotě 30 ohmů, proto hodnota 253 mW u atmosférického režimu byla určena jako referenční. Od ní poté bylo dopočteno, že při kyslíkovém režimu došlo k navýšení výkonu o 16,2 % a v tlakovém režimu dokonce o 26,1 % při koncentraci kyslíku 27,6 %. Došlo tak k navýšení napětí o 0,4 V a proudu o 9,3 mA. Rozdíl všech průběhů je zobrazen na obrázku 4.9, na kterém je vidět výkonový skok při použití kyslíkového krytu. Při přechodu na tlakový režim byl výkon oproti kyslíkovému režimu zřetelný především v blízkosti výkonové špičky, mění se tedy hlavně strmost průběhu.



Obrázek 4.9: Srovnání průběhů výkonu v jednotlivých režimech při 13 V

#### 4.2.2 Měření se 13 V na zdroji elektrolyzáru

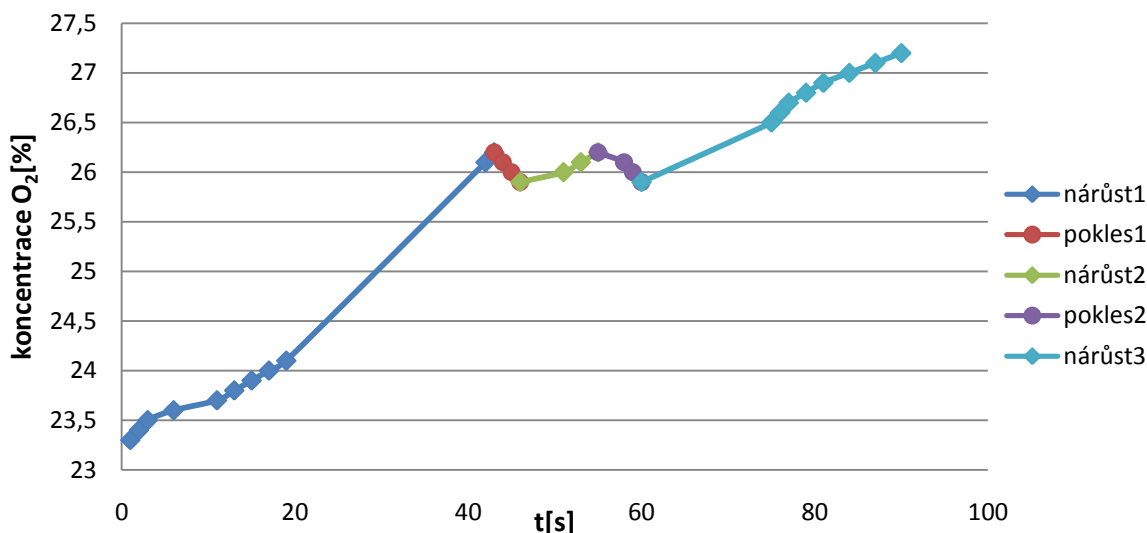
Další sada měření byla provedena v tlakovém režimu při sníženém napětí na zdroji elektrolyzáru na 13 V, při atmosférickém tlaku 977 kPa a teplotě 20,5 °C. Po nájezdovém režimu se PEM článek nechal v nárůstu koncentrace O<sub>2</sub> v tlakovém režimu 1 hodinu, než se přešlo k měření na odporové dekádě. Za tuto dobu se koncentrace O<sub>2</sub> zvýšila na 23,3 %.



Obrázek 4.10: Srovnání průběhů výkonu v tlakovém režimu při 13 V

Průběhy na obrázku 4.10 se velmi podobají průběhům na obrázku 4.9, a to z důvodu postupného navyšování koncentrace O<sub>2</sub>, ale ani třetí průběh se nepřibližuje k výkonu 0,3 W. To může být způsobeno více faktory, především sníženým napětím

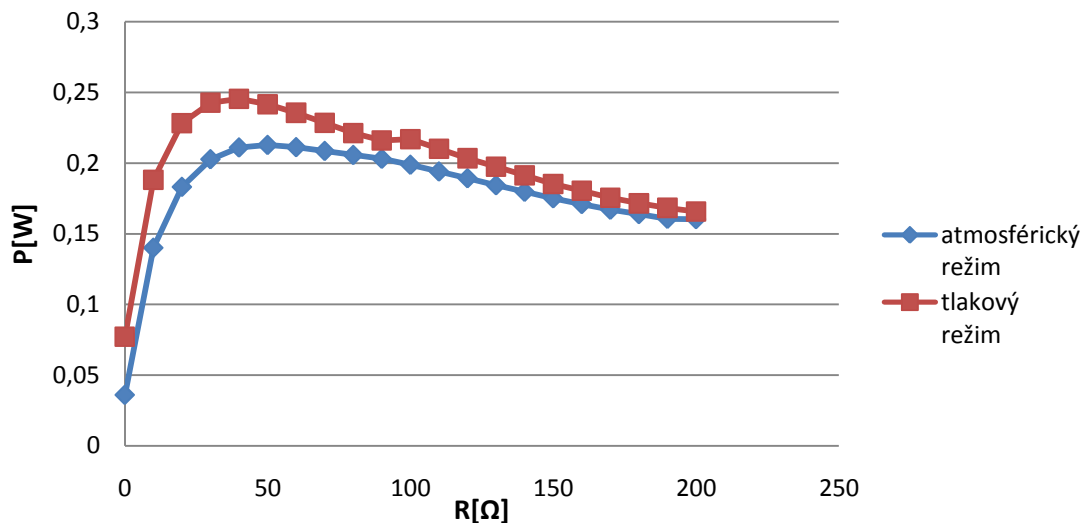
na zdroji elektrolyzáru a tudíž pomalejší výrobě vodíku a kyslíku. Nejvyšší hodnota koncentrace  $O_2$ , které bylo dosaženo při třetím průběhu (po celkem cca 3 hodinách), se pohybovala na 27,2 %, což je částečně zobrazeno v grafu 4.11.



Obrázek 4.11: Nárůst koncentrace  $O_2$  s proměnou zátěží

Nárůst koncentrace  $O_2$  je nelineární, protože nebyl sledován při standardní zátěži, ale při průbězích závislosti výkonu na hodnotě odporové dekády. S navyšováním koncentrace  $O_2$  se postupně zvyšovala i teplota v kyslíkovém krytu. Jeho ochlazení pak zapříčinilo mírné snížení koncentrace  $O_2$ . To bylo způsobeno otevřením okna na dobu přibližně 5 minut. Teplota v kyslíkovém krytu poklesla asi o  $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ . Toto ochlazení bylo provedeno znovu, když koncentrace  $O_2$  začala narůstat a došlo opět ke stejnému jevu. V grafu 4.11 je toho ochlazování zobrazeno kolísáním okolo 26 %  $O_2$ . V další sadě měření (podkapitola 4.2.3) se pokles koncentrace projevil znovu, ale pouze při vyšší koncentraci  $O_2$  v kyslíkovém krytu (při 45 %). Zpočátku, při malé koncentraci  $O_2$ , byl nárůst kyslíku velký, takže se ochlazení na navyšující koncentraci nijak neprojevalo. Tento vliv snížení koncentrace se snižující se teplotou mohl být způsoben nepřesnou odezvou kyslíkové sondy.

Na závěr tohoto měření došlo k odstranění krytu, aby bylo možné porovnat výkonový rozdíl posledního třetího průběhu v tlakovém režimu s atmosférickým režimem.

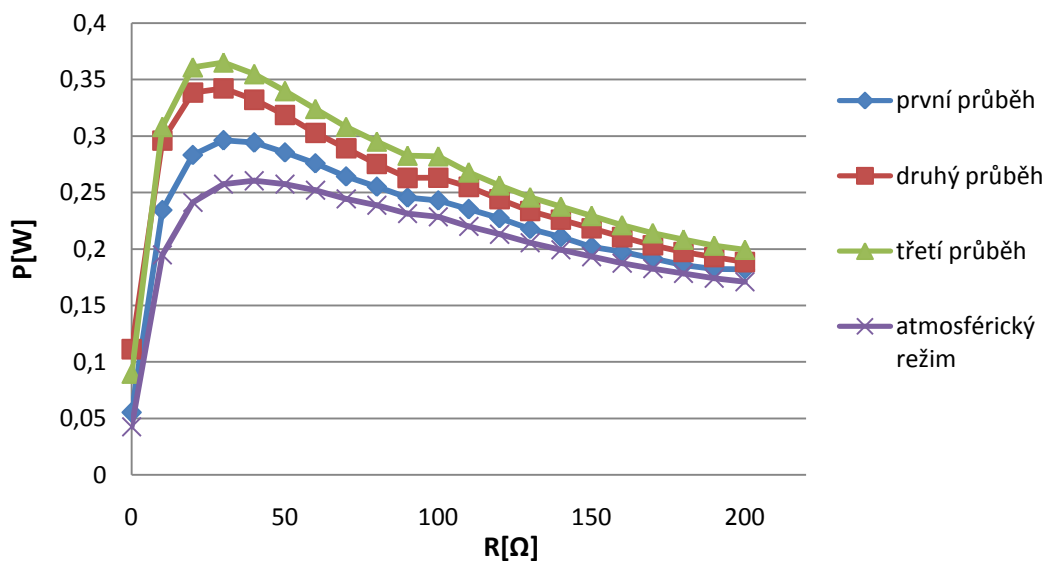


Obrázek 4.12: Porovnání výkonů v tlakovém a atmosférickém režimu

Měření probíhalo při stejném množství vyrobeného vodíku a přibližně stejné teplotě vzduchu. Je zde také velmi znatelný pokles výkonu oproti průběhu v tlakovém režimu, hlavně u výkonové špičky. Výkon tedy poklesl na zátěži 40  $\Omega$  o 14 %.

#### 4.2.3 Měření s 15 V na zdroji elektrolyzáru

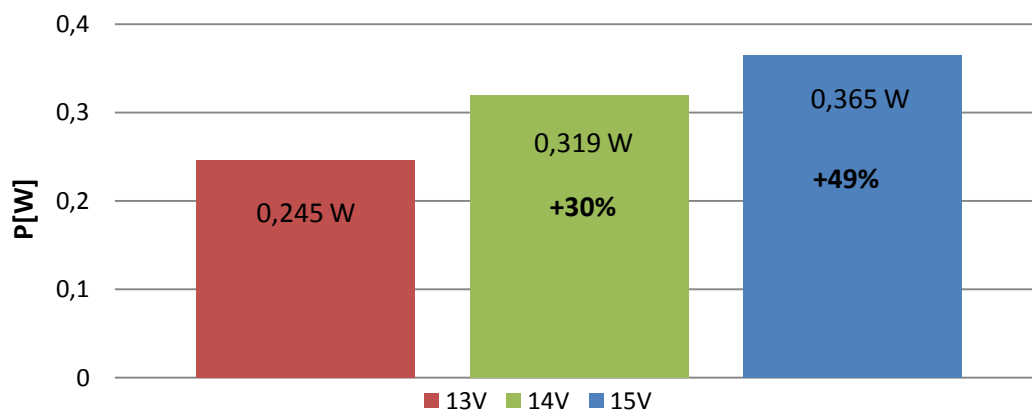
Další sada měření byla provedena v tlakovém režimu při zvýšeném napětí na zdroji elektrolyzáru na 15 V při teplotě 23  $^{\circ}\text{C}$ . V kyslíkovém krytu probíhal oproti předchozím měřením nárůst koncentrace  $\text{O}_2$  značně rychleji. Po 20 minutách od nájezdového režimu byla koncentrace  $\text{O}_2$  na hodnotě 26 %. Všechny naměřené průběhy jsou na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13: Průběhy výkonů v tlakovém a atmosférickém režimu při 15 V

Při této hodnotě 26 % došlo ke změření prvního průběhu s odporovou dekádou, ve které článek dosáhl na zátěži  $30 \Omega$  výkonu 296 mW. Při předchozím měření v kapitole 4.2.2 této hodnoty nebylo dosaženo vůbec.

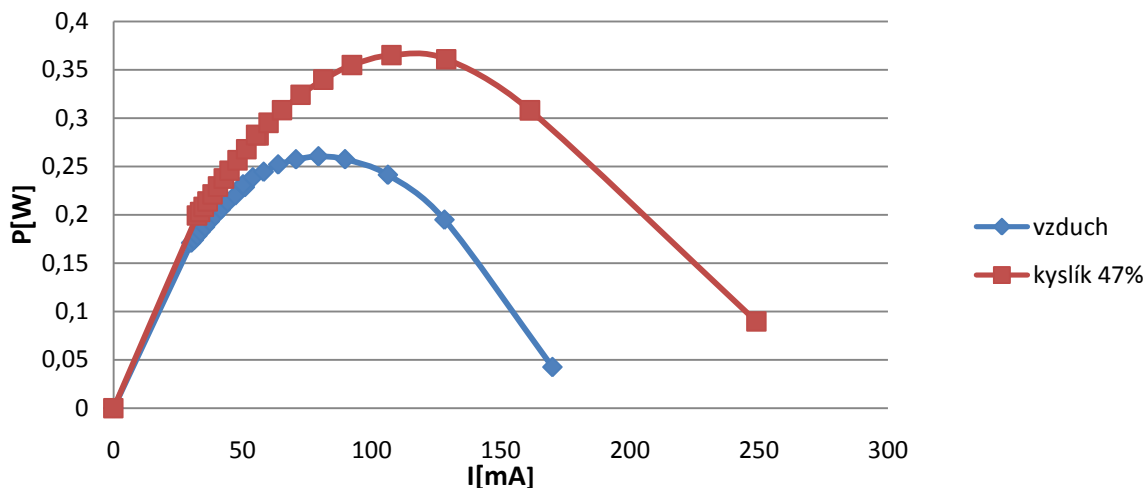
Po přibližně 2 hodinách se koncentrace  $O_2$  v kyslíkovém krytu navýšila na 47,2 %. Při této koncentraci byl naměřen třetí průběh, který se dostal při zátěži  $30 \Omega$  na výkon 365 mW. Oproti předchozímu průběhu, kdy bylo na zdroji pouze 13 V a bylo dosaženo nejvyššího výkonu pouze 245 mW, se výkon navýšil o 49 %.



**Obrázek 4.14:** Porovnání nejvyšších výkonů dosažených při různém napájení

Na závěr došlo opět k odstranění krytu a přešlo se k atmosférickému režimu. Pokles výkonu byl oproti nejvyššímu naměřenému výkonu v tomto měření razantní. Z 365 mW poklesl na 257 mW, což je o 27 % méně. V teoretické části 2.4.2 bylo rozepsáno, že použití čistého kyslíku jako okysličovadla se projevuje hlavně při vyšších proudcích zvýšeným výkonem oproti vzduchu. Při tomto měření bylo v kyslíkovém krytu dosaženo koncentrace  $O_2$  pouze 47 %, ale výkonová diference se zde již výrazně projevuje, což je zobrazeno na obrázku 4.15.

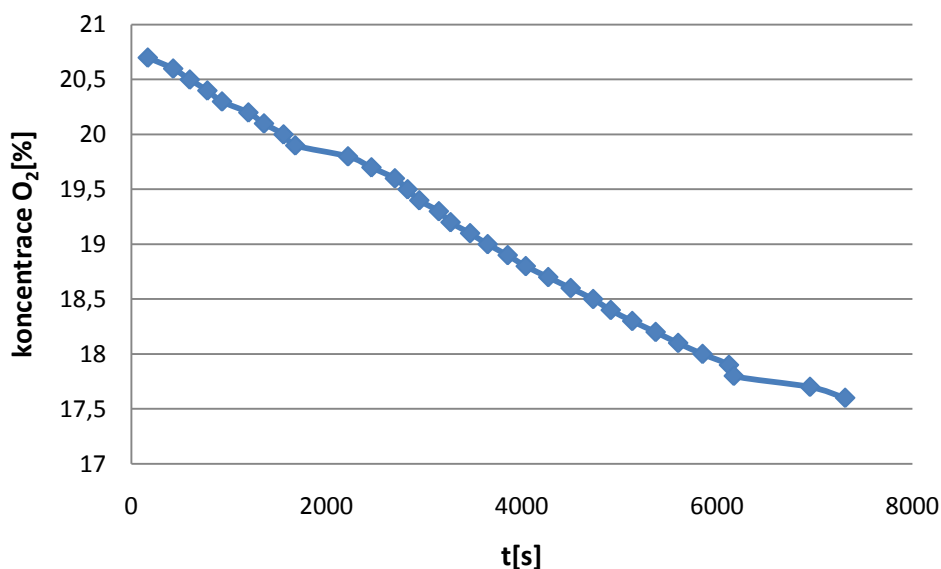




Obrázek 4.15: Vliv okysličovadla na výkon článku

#### 4.2.4 Měření v podtlakovém režimu

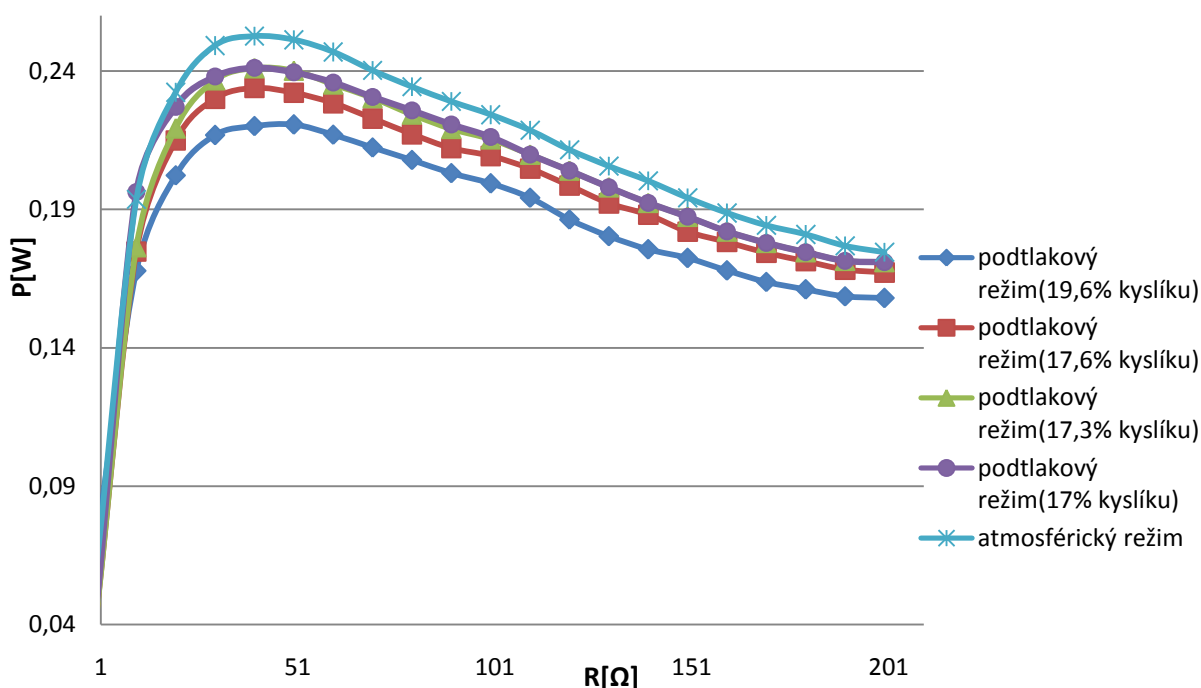
Poslední sada měření byla uskutečněna v podtlakovém režimu s teplotou okolního vzduchu 23 °C a s napětím 14 V na zdroji elektrolyzáru. Nejprve byly utěsněny všechny otvory v krytu a měřilo se, s jakou rychlostí bude PEM článěk kyslík z krytu odebírat. Odběr kyslíku byl poměrně lineární při zapojené standardní zátěži, jen po připojení dekády se při malých výkonech spotřeba kyslíku velmi snížila.

Obrázek 4.16: Snižování koncentrace O<sub>2</sub> v podtlakovém režimu

Po připojení odporové dekády začalo měření závislosti výkonu na zátěži. I přes snižování koncentrace O<sub>2</sub> se výkon PEM článku zvyšoval. Po přibližně 2,5 hodinách došlo k navýšení výkonu o 9 % oproti počátečnímu průběhu a ke snížení koncentrace O<sub>2</sub> na 17,3 %. Na této hodnotě se výkon zastavil a k navyšování v dalším

průběhu již nedocházelo. Je pravděpodobné, že výkon by s dalším snižováním koncentrace  $O_2$  začal klesat, ale tuto variantu nebylo možné z časových důvodů proměřit a ani to pro tuto sadu měření nebyla důležitá.

V dalším kroku došlo k odstranění kyslíkového krytu a přešlo se na atmosférický režim, aby bylo možné porovnat nárůst výkonu při navrácení koncentrace  $O_2$  ze 17 % na 20 %. Všechny tyto průběhy jsou zobrazeny v grafu 4.12. Ve srovnání s posledním průběhem v podtlakovém režimu se po 10 minutách v atmosférickém režimu výkon PEM článku zvýšil v celém průběhu, v nejvyšším bodě na zátěži  $40 \Omega$  došlo k navýšení o 5 %.



Obrázek 4.17: Porovnání výkonů v podtlakovém a atmosférickém režimu

#### 4.2.5 Dynamika výroby kyslíku

Nakonec bylo nutné zjistit, jaké množství vodíku a kyslíku se vyrobí elektrolyzérem pro PEM článek. Elektrolyzér je složen ze sedmi polymerních článků spojených do stacku. Hodnoty udané výrobcem jsou, že při maximálním výkonu, který je doporučen na 50 W, vyrobí elektrolyzér  $230 \text{ cm}^3/\text{min}$  vodíku a  $115 \text{ cm}^3/\text{min}$  kyslíku. Elektrolyzér se ale napájí méně než polovičním příkonem oproti doporučení výrobce z důvodu stáří celé soustavy, aby membrány PEM článku byly šetřeny. Bylo proto nutné změřit množství vyrobeného kyslíku a vodíku při daném příkonu. Měření se provádělo objemovou metodou, kdy se nádoba se stupnicí naplní vodou, otočí se a přivádí se

do ní daný plyn. Ten vytlačuje kapalinu z nádoby a měří se, za jak dlouhou dobu naplní plyn daný objem, v tomto případě vodík  $50 \text{ cm}^3$  a kyslík  $25 \text{ cm}^3$ . Spočítané výsledky naměřených hodnot jsou shrnuty v tabulce 4.4. Zobrazené výkony jsou odvozeny od napětí nastavených na zdroji, tedy 12 V, 13 V, 14 V a 15 V. V posledním sloupci tabulky je dopočten čas, za který by se teoreticky naplnil celý objem krytu 100 % kyslíkem. Nejsou zde ale uvažovány netěsnosti v přívodu od elektrolyzéro a v kyslíkovém krytu.

**Tabulka 4.4:** Produkce  $\text{H}_2$  a  $\text{O}_2$  elektrolyzérem

<b>Příkon [W]</b>	<b>Produkce <math>\text{H}_2</math> [<math>\text{cm}^3/\text{min}</math>]</b>	<b>Produkce <math>\text{O}_2</math> [<math>\text{cm}^3/\text{min}</math>]</b>	<b>Celý objem <math>\text{O}_2</math> v krytu [hod]</b>
6	23,4	14,3	8,8
10	37,5	24,2	5,2
16	58,8	37,5	3,3
23	81,1	41,7	3
50	230	115	1,1

## 5 Závěr

Náplní této práce bylo sledovat chování PEM článku při různé koncentraci kyslíku reagujícího na katodě. Z uvedených měření lze konstatovat, že reakční plyny přiváděné na katodu v přebytku proti normálnímu provozu mají pozitivní vliv na celkový výkon palivových článků, ať už jsou přivedené v jakékoli koncentraci. Tento vliv se projevuje nejvíce při vyšších prouděch, kdy je potřeba dostatečného množství reaktantů na obou elektrodách. To se při měření projevilo při různých napětí na zdroji elektrolyzáru. Při prvním (4.2.1) a druhém měření (4.2.2) bylo překvapující, že v kyslíkovém krytu nebylo dosaženo parciální koncentrace kyslíku ani 30 %. Proto bylo provedeno ještě třetí měření (4.2.3), ve kterém dosáhla koncentrace kyslíku hodnoty 47 %.

Pomalý nárůst koncentrace kyslíku byl způsoben nedokonalým utěsněním systému kyslíkového krytu a přívodu od elektrolyzáru, ale při dostatečné rychlosti výroby kyslíku ve třetím měření už se únik kyslíku tolik neprojevoval. Tzv. kyslíkový režim byl během měření použit pouze jednou, protože byl téměř totožný s tlakovým režimem. Odlišnost těchto dvou režimů se projevovala pouze během nárůstu koncentrace kyslíku. V kyslíkovém režimu se koncentrace zastavila na nižší hodnotě, než u režimu tlakového, a více se již nezvyšovala. U režimu tlakového se koncentrace kyslíku nezastavila ani při vyšší hodnotě, došlo pouze k výraznému zpomalení nárůstu. Úplné zatěsnění systému nebylo provedeno, aby se nenavýšil celkový tlak v kyslíkovém krytu oproti atmosférickému tlaku.

Z měření v podtlakovém režimu lze vyvodit stejný vliv koncentrace kyslíku na výkon článku jako v tlakovém režimu. Výkon sice s klesající koncentrací kyslíku nepoklesl, ale po přechodu na atmosférický režim se v naměřených hodnotách projevilo utlumení výkonu článku při chodu v podtlakovém režimu. Použití čistého kyslíku jako okysličovadla je velmi jednoduchá varianta k navýšení výkonu palivového článku.

## Seznam literatury

- [1] GREISINGER. *Návod k obsluze pro digitální měřič vzdušného kyslíku a teploty s poplachovou funkcí, možností zadání hodnoty tlaku a 1- nebo 2-bodovou kalibrací* Praha: Greisinger. Dostupné z: <http://www.bartex.cz/soubor.aspx?id=72&pid=10>
- [2] CONRAD ELECTRONIC ČESKÁ REPUBLIKA s. r. o. *Návod k obsluze pro software GSOF 3050*. Praha: Conrad Electronic Česká republika s. r. o. Dostupné z: [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/100507-an-01-cs-Software\\_GMH.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/100507-an-01-cs-Software_GMH.pdf)
- [3] Krajní meze člověka. *Distantworlds.wz.cz* [online]. [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: <http://www.distantworlds.wz.cz/DisWorlds1-2/Zivot/Meze.htm>
- [4] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články*. Řež: Ústav Jaderného Výzkumu Řež a.s., 2002. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [5] HORÁK, Bohumil, Jiří KOZIOREK. *Studie pohonu mobilního prostředku s palivovým článkem*. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, 2005. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/5064.pdf>
- [6] GREISINGER. *Průmyslová měřicí technika 2013-2014: měření, řízení, regulace*. Praha: Greisinger, 2013, 147 s.
- [7] HADRAVA Jan, Roman VOKATÝ, Tomáš HLINČÍK a Daniel TENKRÁT. Porovnání kvality vodíku z různých technologií výroby. *Paliva* [online]. 2013, roč. 5, č. 3, str. 79-83 [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: [paliva.vscht.cz/download.php?id=95](http://paliva.vscht.cz/download.php?id=95)
- [8] ŠEBOR, Gustav, Milan POSPÍŠIL a Jan ŽÁKOVEC. *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě*. 2006. Dostupné z: [http://www.mdcz.cz/NR/rdonlyres/F2EF24EF-5E59-42C7-B6C7-A5508CE8F820/0/Technickoekonomicka\\_analyza\\_vhodnych\\_alternativnich\\_paliv\\_v\\_dopravcast\\_1.pdf](http://www.mdcz.cz/NR/rdonlyres/F2EF24EF-5E59-42C7-B6C7-A5508CE8F820/0/Technickoekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_dopravcast_1.pdf)

- [9] GROLIK, Benno a KOPP, Joachim. *Fuel Cells*. 2003. Dostupné z: <http://home.fnal.gov/~jkopp/tum/pdf/F/brz.pdf>
- [10] DOLEŽEL, Ivo. Palivové články – princip, konstrukce, vlastnosti a využití. *Elektro*, 1999, č. 10, str. 5-8.
- [11] BADWAL S.P.S a S. GIDDEY. The Holy Grail of Carbon Combustion – the Direct Carbon Fuel Cell Technology. *Materials Forum Volume* [online]. 2010, vol. 34, s. 181-182 [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP104697&dsid=D S9>
- [12] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 158 s. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [13] MANFRED, Flohr. *Palivové články klepou na dveře*. *Chip* [online]. březen 2006, s. 24-26 [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: <http://www.chip.cz/dokumenty/palivove-clanky-klepou-na-dvere>
- [14] OBALOVÁ Lucie, Marek VEČEŘ, Kamila KOČÍ a Zuzana JANKOVSKÁ. *Návody do laboratoře procesního inženýrství I*. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, 2013. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~vec05/PI/LabPI/navody/Navody\\_LPI.pdf](http://homen.vsb.cz/~vec05/PI/LabPI/navody/Navody_LPI.pdf)
- [15] ZHANG, Jianlu, Huamin ZHANG, Jinfeng WU a JiuJun ZHANG. *Pem Fuel Cell Testing and Diagnosis*. Elsevier: Copyright, 2013. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444536884010019>
- [16] PFLUG, Aleš. *Možnosti zvýšení výkonu palivového článku PEM*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Pavel Štekl. Dostupné také z: <https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?ty p=1&adipidno=47503>
- [17] Zákon Daltonův. *Oldweb.izip.cz* [online]. [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: <http://oldweb.izip.cz/ds3/hypertext/JVAGA.htm>

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Elektrárna Santa Clara [4] .....	13
Obrázek 2.2: PEM článěk .....	16
Obrázek 2.3: Princip činnosti PEM článku.....	18
Obrázek 2.4: Kyslíkový kryt.....	19
Obrázek 2.5: Experimentální závislost tlaku na klidovém napětí pro různou teplotu a katalyzátor [8] .....	21
Obrázek 2.6: Vliv okysličovačla na výkon článku (při teplotě 60 °C a tlaku 3 bary). [8] .....	22
Obrázek 2.7: Polarizační ztráty (aktivační, ohmická, koncentrační) [5] .....	24
Obrázek 3.1: Přístroj oxymetr s USB kabelem.....	26
Obrázek 3.2: Sonda GGO 370 upevněná v krytu .....	28
Obrázek 3.3: Tabulky zobrazené v programu GSOFT .....	29
Obrázek 4.1: Na velkém obrázku je zobrazen komplex StaXX Exhibition, na těch menších je zachycena úprava jednotlivých částí na tlakový režim .....	30
Obrázek 4.2: Použité zátěže - vlevo odporová dekáda, vpravo standardní zátěž .....	31
Obrázek 4.3: Výkonová charakteristika.....	33
Obrázek 4.4: Nárůst koncentrace O <sub>2</sub> v kyslíkovém režimu.....	33
Obrázek 4.5: Výkonová charakteristika v kyslíkovém režimu.....	34
Obrázek 4.6: Nárůst koncentrace O <sub>2</sub> v tlakovém režimu.....	34
Obrázek 4.7: Nárůst koncentrace O <sub>2</sub> v tlakovém režimu.....	35
Obrázek 4.8: Srovnání výkonových maxim v jednotlivých režimech.....	36
Obrázek 4.9: Srovnání průběhů výkonu v jednotlivých režimech při 13 V .....	37
Obrázek 4.10: Srovnání průběhů výkonu v tlakovém režimu při 13 V .....	37
Obrázek 4.11: Nárůst koncentrace O <sub>2</sub> s proměnou zátěží .....	38
Obrázek 4.12: Porovnání výkonů v tlakovém a atmosférickém režimu.....	39
Obrázek 4.13: Průběhy výkonů v tlakovém a atmosférickém režimu při 15 V.....	39
Obrázek 4.14: Porovnání nejvyšších výkonů dosažených při různém napájení.....	40
Obrázek 4.15: Vliv okysličovačla na výkon článku .....	41
Obrázek 4.16: Snižování koncentrace O <sub>2</sub> v podtlakovém režimu .....	41
Obrázek 4.17: Porovnání výkonů v podtlakovém a atmosférickém režimu.....	42

## Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Hodnoty $\Delta g_f$ pro uvedenou reakci 2.9 při různé teplotě.....	22
Tabulka 4.1: Použité přístroje .....	31
Tabulka 4.2: pH a konduktivita vody .....	32
Tabulka 4.3: pH a konduktivita vody v tlakovém režimu .....	35
Tabulka 4.4: Produkce H <sub>2</sub> a O <sub>2</sub> elektrolyzérem .....	43