



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PALIVOVÝ ČLÁNEK S METALHYDRIDOVÝM ÚLOŽIŠTĚM VODÍKU

FUEL CELL WITH METAL HYDRIDE HYDROGEN STORAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Bruzl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

BRNO 2021



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: David Bruzl

ID: 211103

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Palivový článek s metalhydridovým úložištěm vodíku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte s principem, funkcí a vlastnostmi nízkoteplotních vodíkových palivových článků, především pak článků typu PEMFC. Seznamte se s problematikou vodíkových zásobníků se zaměřením na metalhydridové zásobníky vodíku. S využitím komerčně dostupného palivového článku a metalhydridového zásobníku vodíku, které jsou k dispozici na Ústavu elektrotechnologie, sestavte funkční systém. Proměřte základní charakteristiky a navrhnete provozní režim celého zařízení. Výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího bakalářské práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 1.6.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou vodíkových palivových článků a skladováním vodíku. Je zde popsána historie vývoje palivových článků, princip jejich funkce a jejich jednotlivé typy se zaměřením na nízkoteplotní palivové články, speciálně pak článek typu PEMFC. Dále jsou popsány metody skladování vodíku se zaměřením na metalhydridové úložiště. V práci je popsáno navržení a sestavení systému s palivovým článkem H-200, jsou změřeny jeho základní charakteristiky a diskutovány odlišnosti vůči charakteristikám od výrobce. Součástí je dále popis chování metalhydridového úložiště HS-760 při vybíjení. Toto chování je měřeno programem, který byl vytvořen v prostředí Labview. Práce obsahuje popis tohoto programu. Program a jím měřená data jsou v elektronických přílohách. Jedna kapitola práce se také věnuje provozním režimům celého systému.

Klíčová slova

vodík, palivový článek, vodíkové úložiště, PEMFC, metalhydrid

Abstract

The bachelor thesis deals with hydrogen fuel cells and hydrogen storage. It describes the history of fuel cell development, the principle of their function and their individual types, with a focus on low-temperature fuel cells, especially the PEMFC type. Hydrogen storage methods are also described, with a focus on metal hydride storage. The design and assembly of the H-200 fuel cell system is described, its basic characteristics are measured and its differences from the manufacturer's characteristics are discussed. The discharge behavior of the HS-760 metal hydride storage system is also included. This behavior is measured by a program that was developed in the Labview environment. The thesis contains a description of this program. The program and the measured data are in the electronic appendices. One chapter of the thesis is also devoted to the operating modes of the whole system.

Keywords

hydrogen, fuel cell, hydrogen Storage, PEMFC, metal hydride

Bibliografická citace:

BRUZL, David. *Palivový článek s metalhydridovým úložištěm vodíku* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133344>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Vítězslav Novák.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *David Bruzl*

VUT ID studenta: *211103*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2020/21*

Téma závěrečné práce: *Palivový článek s metalhydridovým úložištěm vodíku*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 1. června 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vítězslavu Novákovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 1. června 2021

.....
podpis autora

Obsah

SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. HISTORIE PALIVOVÉHO ČLÁNKU.....	11
2. PALIVOVÝ ČLÁNEK	13
2.1 PRINCIP PALIVOVÉHO ČLÁNKU	13
2.2 MĚŘENÍ PALIVOVÉHO ČLÁNKU.....	14
2.3 VÝHODY A NEVÝHODY PALIVOVÉHO ČLÁNKU	15
3. TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ.....	16
3.1 NÍZKOTEPLTNÍ PALIVOVÉ ČLÁNKY.....	16
3.1.1 Palivový článek s polymerní membránou (PEMCF).....	16
3.1.2 Palivový článek s alkalickým elektrolytem (AFC).....	18
3.1.3 Palivový článek pro přímou reakci methanolu (DMFC).....	20
3.2 STŘEDNĚTEPLTNÍ PALIVOVÉ ČLÁNKY	20
3.2.1 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)	20
3.3 VYSOKOTEPLTNÍ PALIVOVÉ ČLÁNKY	21
3.3.1 Palivový článek s uhlíčitánovou taveninou (MCFC)	21
3.3.2 Palivový článek s pevným elektrolytem (SOFC)	21
4. SKLADOVÁNÍ VODÍKU	23
4.1 SKLADOVÁNÍ VODÍKU V TLAKOVÝCH NÁDOBÁCH.....	23
4.2 SKLADOVÁNÍ VODÍKU V KAPALNÉ FÁZI.....	24
4.3 SKLADOVÁNÍ VODÍKU DO METALHYDRIDOVÉHO ÚLOŽIŠTĚ	24
4.3.1 Metalhydridy.....	25
4.3.2 Využití a budoucnost metalhydridových úložišť	25
5. MĚŘENÝ SYSTÉM S PALIVOVÝM ČLÁNKEM.....	27
5.1 ZPROVOZNĚNÍ MĚŘENÉHO SYSTÉMU	28
5.2 OVLÁDÁNÍ A MĚŘENÍ SYSTÉMU	29
5.2.1 Měřicí ústředna 34972A.....	30
5.2.2 Program pro měření systému	31
5.3 VÝROBA VODÍKU POMOCÍ ELEKTROLYZÉRU EL 100	33
5.4 UKLÁDÁNÍ VODÍKU DO METALHYDRIDOVÉHO ÚLOŽIŠTĚ HS760.....	34
5.5 PALIVOVÝ ČLÁNEK H-200.....	36
6. PROVOZNÍ REŽIM MĚŘENÉHO SYSTÉMU	43
6.1 REŽIM NABÍJENÍ/VYBÍJENÍ ÚLOŽIŠTĚ	43
6.2 KONTINUÁLNÍ BĚH ELEKTROLYZÉRU A PALIVOVÉHO ČLÁNKU	44
7. ZÁVĚR.....	45
LITERATURA.....	46
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
SEZNAM PŘÍLOH.....	49

Seznam obrázků

1.1	Návrh W. R. Groverova článku [2]	11
1.2	Francis Thomas Bacon a jeho palivový článek [4].....	12
2.1	Princip palivového článku [3]	13
2.2	Polarizační křivka palivového článku [3].....	15
3.1	Palivový článek s polymerní membránou (PEMFC) [3]	17
3.2	Palivový článek s alkalickým elektrolytem (AFC) [6].....	19
5.1	Měřený systém s palivovým článkem	27
5.2	Blokové schéma měřeného systému.....	29
5.3	Blok spínačů pro ovládání systému.....	30
5.4	Měřicí ústředna Agilent 34972A	30
5.5	Přepoččet proudu na tlak v programu pro měření	31
5.6	Nastavení přístrojů a měření.....	32
5.7	Měření teploty a tlaku	32
5.8	Elektrolyzér ACTA EL100	33
5.9	Metalhydridové úložiště HS760	34
5.10	Metalhydridové úložiště při nabíjení.....	35
5.11	Metalhydridové úložiště při vybíjení.....	35
5.12	Závislost tlaku na teplotě při vybíjení úložiště.....	36
5.13	Palivový článek H-200 [9]	36
5.14	Zapojení palivového článku včetně řídicí jednotky.....	37
5.15	Palivový článek a příslušné komponenty	38
5.16	Voltampérová charakteristika palivového článku H-200	39
5.17	Závislost průtoku vodíku na výkonu palivového článku H-200.....	40
5.18	Závislost výkonu palivového článku na výstupním proudu	40
5.19	Voltampérová charakteristika měřeného palivového článku.....	41
5.20	Závislost výkonu měřeného palivového článku na výstupním proudu.....	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Typy palivových článků.....	16
Tabulka 4.1 Hustota vodíku pro různá skupenství, teplotu a tlak [13]	24
Tabulka 5.1 Technické specifikace HS760	34
Tabulka 5.2 Technické specifikace H-200.....	38

ÚVOD

Vývoj společnosti s sebou přináší čím dál větší nároky na spotřebu elektrické energie, ovšem také na čistotu použité energie, tzn. původ spotřebované energie, a to s důrazem na snižování emisí skleníkových plynů a také čisté životní prostředí ve městech, kde největším zdrojem znečištění je doprava. Řešením znečištění plynoucího z dopravy by vedle elektromobilů mohla být také vozidla, které jako zdroj energie využívají vodík, který se přeměňuje ne energii elektrickou v palivových článcích.

Vývoj palivových článků sahá až do první poloviny 19. století. Jejich velkému rozvoji přispělo využití v kosmickém průmyslu, například při misi Apollo. Palivový článek přímo přeměňuje chemickou energii na elektrickou, při samotné přeměně nevznikají žádné škodlivé emise.

Palivové články se nejčastěji dělí podle jejich pracovní teploty. Nízkoteplotní pracují s teplotou do 150 °C. Mezi nízkoteplotní palivové články patří Alkalický palivový článek (AFC), který používá jako elektrolyt hydroxid draselný, tento článek byl použit právě při misi Apollo. Patří sem také články, které jako elektrolyt využívají polymerní membránu. Právě článek s polymerní membránou (PEMFC) je v práci rozebrán nejpodrobněji.

Samotnou výzvou používání vodíku jako zdroje elektrické energie není jen jeho přeměna v palivovém článku, ale také způsob jeho skladování. Mezi konvenční metody skladování vodíku patří jeho skladování v plynné formě v tlakových láhvích. Velmi nízká hustota vodíku vede k potřebě vodík stlačit a snížit tak jeho objem. Tuto metodu využívá například automobilový výrobce Toyota ve svých vodíkových vozech série *Mirai*.

Další možností skladování vodíku je jeho skladování v kapalně formě. Teplota varu vodíku je ovšem -253°C, proto je nutné vodík schladit na tuto teplotu. Vodík lze také skladovat v metalhydridových úložištích, kdy se vodík váže do materiálu na bázi kovů. Tento typ ukládání funguje při poměrně nízkých teplotách a tlacích, problémem ovšem zůstává menší hmotnostní hustota a také výrazná závislost teploty a tlaku. Přesto je tato technologie velmi zkoumána a je příslibem do budoucnosti.

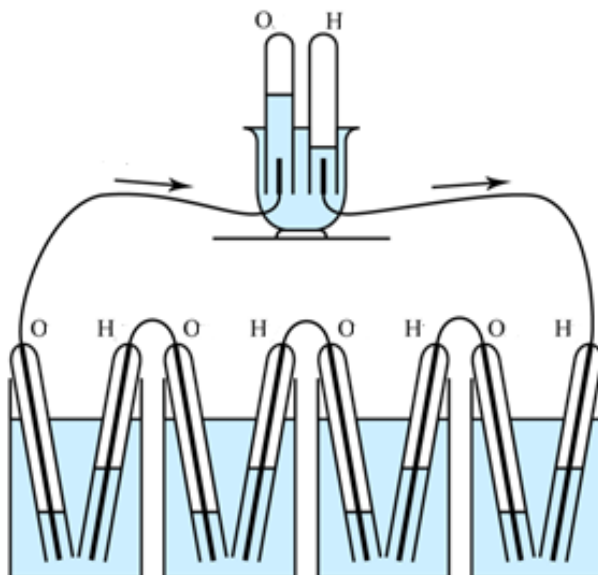
Práce je členěna do kapitol, v kapitole 1 se věnuje historii vývoje palivového článku, následuje vysvětlení principu fungování a měření palivového článku (kapitola 2). V kapitole 3 se práce věnuje rozdělení jednotlivých typů palivových článků, včetně popisu jednotlivých typů. V poslední čistě teoretické kapitole (kapitola 4) se práce věnuje způsobům ukládání vodíku se zaměřením na metalhydridové úložiště.

Kapitola 5 již popisuje konkrétní měřený systém. Jsou zde popsány jednotlivé části systému, včetně navrženého programu pro měření systému a také jeho ovládání. Dále jsou změřeny základní charakteristiky palivového článku a metalhydridového úložiště. Další kapitola (kapitola 6) se věnuje konkrétním provozním režimům celého systému, včetně výpočtu účinnosti systému při jednom z těchto provozních režimů. V kapitole 7 je stručně shrnuta celá práce a diskutovány případné možnosti rozvoje celého systému.

1. HISTORIE PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Historie palivových článků sahá až do první poloviny 19. století, konkrétně ve třicátých letech 19. století provedl britský vědec, vystudovaný právník a soudce Sir William Robert Grove, sérii pokusů, kterými zjistil, že je možné vyrábět elektrickou energii procesem, který je opačný k elektrolýze vody. Jeho prototyp prvního palivového článku používal jako elektrolyt kyselinu sírovou, do ní byly ponořeny dolní konce platinových elektrod, které byly umístěny ve skleněných trubičkách, jejichž horní části byly uzavřeny a vyplněny kyslíkem a vodíkem (obrázek 1.1). Napětí tohoto článku bylo přibližně 1 V.

Princip palivového článku objevil a popsal již v roce 1838 německo-švýcarský chemik Christian Friedrich Schönbein a výsledky publikoval o měsíc dříve než Grove, součástí ale nebyl funkční prototyp, proto se za datum vytvoření prvního prototypu palivového článku bere datum, kdy výsledky své práce publikoval Grove, tedy únor roku 1839. [1]



Obrázek 1.1 Návrh W. R. Groverova článku [2]

Přesně o padesát let později, v roce 1889, poprvé použili Ludwig Mond a Carl Langer termín „palivový článek“. Podařilo se jim sestavit článek, který měl výstupní proud 2 až 3 A při napětí 0,73 V. Praktickou aplikaci tohoto článku limitovala velmi vysoká cena a také rychlý pokles výkonu článku.

V roce 1932 zahájil Francis Thomas Bacon práce na zlepšení Mond-Langerova článku. Namísto velmi korozivního kyselého elektrolytu použil zásaditý alkalický hydroxid draselný (KOH), který neměl na elektrody korozivní účinky. Jeho článek byl v roce 1959 patentován, o rok později veřejně představil palivový článek s výkonem 5 až 6 kW. Vysoký tlak plynu uvnitř článku (20 až 40 barů) a jeho vysoká teplota

(více než 200 °C) zajistili vyšší proudovou hustotu (0,2 až 0,4 A/cm²), ale také velké rozměry a hmotnost. Jeho palivový článek je na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2 Francis Thomas Bacon a jeho palivový článek [4]

V šedesátých letech dvacátého století získal výrobce Pratt & Whitney licenci pro využití patentů Francise Thomase Bacona. Cílem výrobce bylo snížení hmotnosti článku. S výrazným zvýšením koncentrace roztoku KOH (85 %) použitého jako elektrolyt mohlo dojít k výraznému snížení tlaku plynu. Tyto články použil Národní úřad pro letectví a vesmír (NASA) jako zdroj elektrické energie při misi Apollo. Jejich úspěšné užití v kosmickém průmyslu výrazně přispělo k intenzivnímu pokroku ve vývoji a studiu palivových článků, který trvá do dnes. [1][3]

Národní akční plán čisté mobility [5], jehož aktualizaci schválila vláda České republiky 27.4.2020, počítá s výrazným využitím palivových článků pro budoucí automobilovou dopravu. Doslova se v něm uvádí:

„I když se v současnosti může zdát, že hlavním směrem čisté mobility bude bateriová elektromobilita, některé strategické dokumenty Evropské komise a studie ukazují, že elektrizace dopravy nemusí být řešením pro všechny druhy dopravy. Aktualizace NAP CM v tomto směru zohledňuje i současné vývojové trendy a plány některých, zejména asijských, automobilek ve vztahu k vodíkové elektromobilitě. Z nich jednoznačně vyplývá, že technologie vodíkových palivových článků umožňuje nasazení nejen v oblasti osobní silniční dopravy, ale i v nákladní silniční dopravě, kde může mít dokonce do budoucna větší využití než technologie bateriová.“ [5]

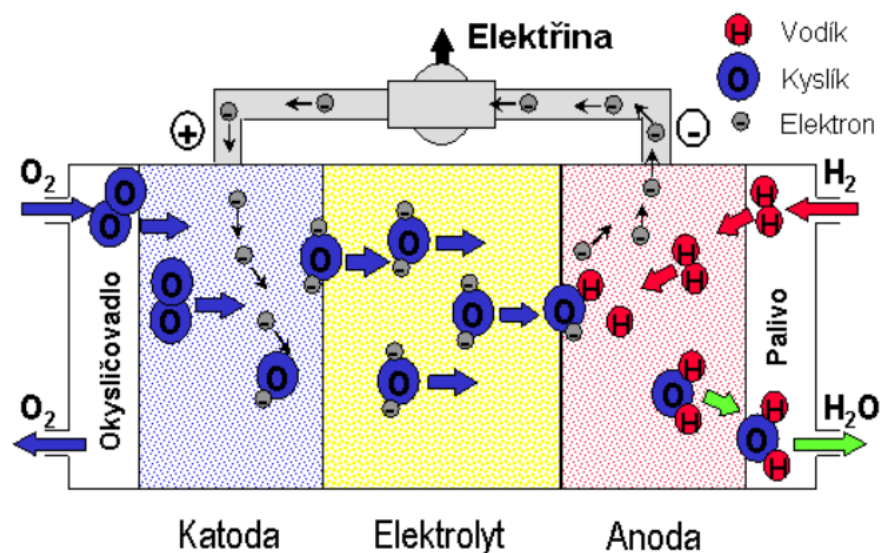
2. PALIVOVÝ ČLÁNEK

Palivový článek je zařízení, které přímo přeměňuje chemickou energii paliva během oxidačně-redukční reakce na energii elektrickou. Samotný palivový článek má nízkou hodnotu výstupního napětí (jednotky voltů), proto se v praktickém užití skládá více článků do série, čímž dosáhneme vyššího výstupního napětí, při prakticky neměnné účinnosti.

2.1 Princip palivového článku

Palivový článek se skládá ze dvou elektrod, které jsou odděleny membránou nebo elektrolytem. Základní princip je pro všechny palivové články, liší se však materiálem elektrod, palivem, pracovní teplotou, typem elektrolytu. Palivový článek se svojí činností podobá klasickým akumulátorům, kde se rovněž přímo přeměňuje chemická energie na energii elektrickou, palivový článek ale užívá z vnějšku dodané palivo, což umožňuje delší provoz. Jako palivo může být použit vodík v kapalném nebo plynném stavu případně to mohou být různé alkoholy nebo uhlovodíky, které obsahují vodík. Tento vodík je z nich následně uvolňován. Jedná se například o metan, zemní plyn, propan, metanol.

Princip je vysvětlen na článku, kde jako palivo je použit vodík a jako okysličovadlo čistý kyslík, viz obrázek 2.1 [3]



Obrázek 2.1 Princip palivového článku [3]

Na katodu palivového článku je přiváděn kyslík, kde se dvěma elektrony redukuje na anion kyslíku, který přes elektrolyt přechází k anodě. Reakci na katodě popisuje následující rovnice



Na anodu palivového článku se přivádí palivo, v našem případě vodík, redukuje se zde s kyslíkovým aniontem. Vzniká voda/vodní pára, uvolní se elektrony, které jsou z anody vedeny na katodu, nikoliv přes elektrolyt, ale venkovním obvodem, jako elektrický proud. [3]

Reakci na anodě popisuje následující rovnice



Sumární reakce tedy je



2.2 Měření palivového článku

Při měření palivového článku vycházíme ze základního předpokladu teoretického napětí palivového článku

$$U_{teor} = \frac{\Delta g_f}{F}, \quad (2.4)$$

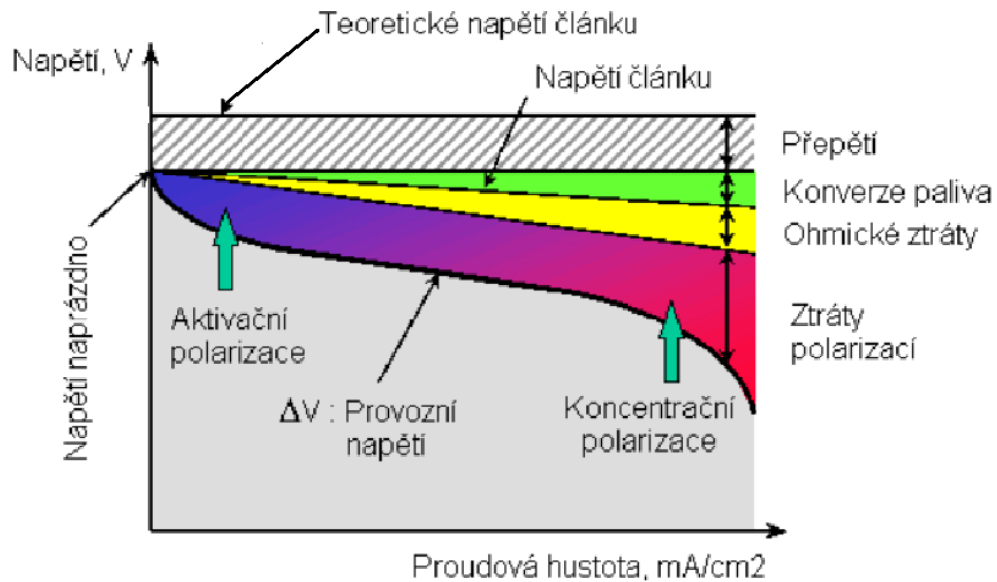
kde U_{teor} [V] je teoretické napětí palivového článku, Δg_f [V.mol⁻¹] je energie, potřebná pro pohyb náboje skrz potenciál, pokud množství náboje oxidovaného na anodě a redukováného na katodě je totožné pro jeden mol reaktantu a F [mol⁻¹] je Avogadrova konstanta.

Na teoretickou hodnotu napětí se ovšem v praktickém použití není možné dostat. Rozdíl mezi reálnou hodnotou a teoretickou hodnotou napětí článku určuje degradaci palivového článku.

Nejčastějším typem měření palivového článku je měření jeho polarizační křivky (respektive V-A charakteristiky). Ta se dá rozdělit do tří oblastí, v každé oblasti se primárně uplatňují jiné ztráty. Její průběh je znázorněn na obrázku 2.2.

V první oblasti dochází k výraznému poklesu napětí při zvyšující se zátěži. Hlavním zdrojem tohoto poklesu jsou ztráty aktivační polarizací. Ve druhé oblasti můžeme sledovat prakticky lineární pokles napětí při zvyšujícím se zatížení, který je způsoben vnitřním odporem membrány a také ohmickými ztrátami na svorkách článku a elektrodách.

V poslední, třetí, oblasti sledujeme výraznější pokles napětí, zde dochází k nedostatečnému transportu látky, respektive vodík je spotřebováván rychleji, než se stačí do článku dodávat. [3][15]



Obrázek 2.2 Polarizační křivka palivového článku [3]

2.3 Výhody a nevýhody palivového článku

Mezi výhody palivového článku patří:

- poměrně vysoká účinnost, dochází zde pouze k přeměně chemické energie paliva na energii elektrickou,
- výrazně nižší emise než ostatní technologie spalování fosilních paliv,
- nehlukný provoz,
- modulárnost, palivové články se dají konstruovat ve velkém rozsahu výkonů, při takřka neměnné účinnosti,
- po úpravě se dá použít velký rozsah plynů jako palivo.

Naopak mezi nevýhody patří:

- s dobou provozu palivového článku klesá jeho účinnost,
- poměrně vysoké investiční náklady,
- požadavek na čistotu paliva (některé příměsi by mohly nevhodně reagovat s elektrolytem) .

Jednotlivé typy palivových článků mají vzhledem k použitému palivu, elektrolytu a konstrukci specifické výhody, nevýhody a možnosti užití. [1][3]

3. TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Typy palivových článků (Tabulka 3.1) se liší na základě rozdílné provozní teploty, použitého elektrolytu a paliva. Nejčastěji se články rozdělují do kategorií podle jejich provozní teploty. Práce se zaměřuje na nízkoteplotní palivové články, především pak na membránový článek, proto jsou popsány podrobněji, než články středněteplotní a vysokoteplotní.

Tabulka 3.1 Typy palivových článků

Typ palivového článku	Pracovní teplota	Elektrolyt
Palivový článek s polymerní membránou (PEMCF)	50-100 °C	Polymerní membrána
Palivový článek s alkalickým elektrolytem (AFC)	20-90 °C	Hydroxid draselný
Palivový článek pro přímou reakci metanolu (DMFC)	50-100 °C	Polymerní membrána
Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)	160-220 °C	Kyselina fosforečná
Palivový článek s uhličitanovou taveninou (MCFC)	600-700 °C	Taveniny alkalických uhličitanů
Palivový článek s pevným elektrolytem (SOFC)	800-1050 °C	Iontově vodivý pevný materiál

3.1 Nízkoteplotní palivové články

Pracovní teplota nízkoteplotních palivových článků nepřesahuje hodnotu 150 °C. Mezi nejznámější zástupce této kategorie patří membránové, alkalické a články pro přímou reakci metanolu

3.1.1 Palivový článek s polymerní membránou (PEMCF)

U PEMFC (Proton-Exchange Membrane Fuel Cell) je jako elektrolyt použita polymerní membrána, Jedná se o polymer s funkčními skupinami zásad nebo kyselin.

Jak už naznačuje jeho zařazení do kategorie nízkoteplotních palivových článků, PEMFC pracuje při nízkých teplotách (80 °C), při tlaku 2 až 5 barů.

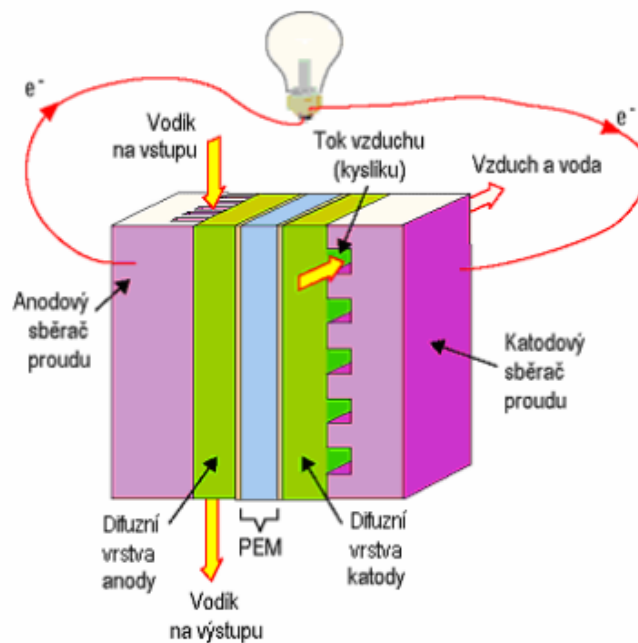
Článek (obrázek 3.1) se tedy skládá z membrány, která je umístěna mezi dvěma porézními elektrodami, na jejichž povrch je nanесena vrstva platiny, sloužící jako katalyzátor. Platinový katalyzátor se využívá, protože na sebe dokáže vázat vodík a kyslík, při uvolňování meziproductů, které se využívají v elektrochemické reakci, aniž by se sám spotřebovával, jak popisují rovnice:



Použití platiny jako katalyzátoru ovšem zvyšuje cenu palivového článku, proto je nutné konstruovat elektrody co s možná největším katalytickým povrchem, ale zároveň se snahou co nejvíce omezit použití platiny.

Elektroda se proto vyrábí z porézního uhlíku s velmi malými částicemi platiny (2 nm), což znamená poměrně velkou plochu pro reagující plyny za použití nízkého množství platiny.

Elektroda má svoji katalytickou vrstvu, která se přímo dotýká membrány, ale také difuzní vrstvu. Tato difuzní vrstva je tvořena porézní strukturou, což umožňuje difuzi reaktantů k povrchu elektrody. Na tuto difuzní vrstvu jsou přitlačeny desky, která slouží k vyvedení elektrického proudu a k distribuci plynu. Za tímto účelem jsou v desce vytvořeny rozváděcí kanálky, které zajišťují efektivní přívod reaktantů, stejně jako odvod vody.



Obrázek 3.1 Palivový článek s polymerní membránou (PEMFC) [3]

Palivo (vodík) přes kanálky postupuje k anodě, kde se po reakci s katalyzátorem rozdělí atom vodíku na dva kladné protony a dva elektrony. Protony prochází skrz membránu, ovšem pro elektrony je tato elektricky izolovaná membrána neprůchozí, proto se ke katodě přesouvají po externím elektrickém obvodu, kde jsou využity pro výkon práce, jako elektrický proud.

Reakce na anodě je popsána rovnicí



reakce na katodě pak



celková sumární reakce je pak



Mezi výhody PEM článků patří zejména jejich nízká pracovní teplota, z toho plynoucí rychlý náběh a reakce na změny výkonu. Není tolik náchylný ke korozi, má kompaktní rozměry, jeho funkce není závislá na poloze, což umožňuje komfortní použití v mobilních aplikacích, či trakci.

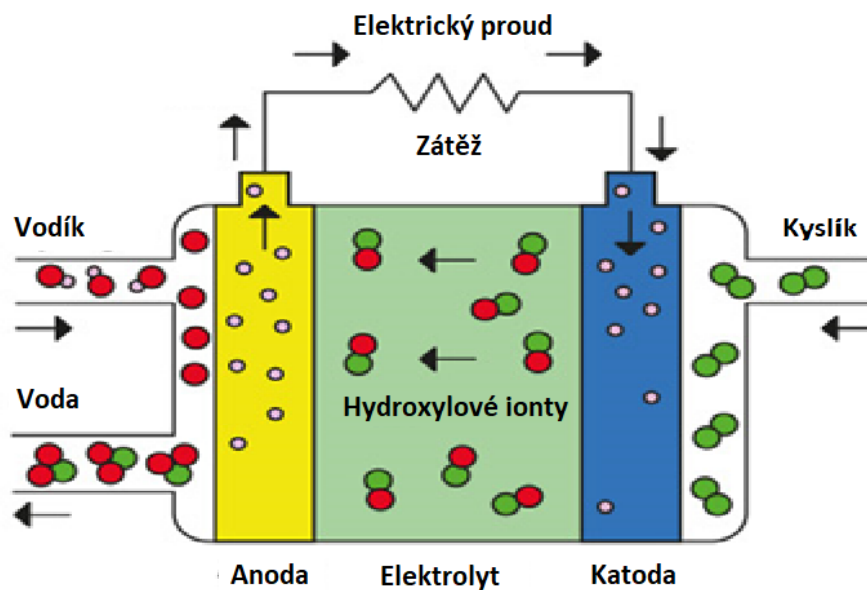
Jako jiné palivové články se, pro zvýšení napětí, dají skládat do větších celků. Účinnost PEMFC se pohybuje v rozmezí 50–60%.

Mezi jeho nevýhody patří problematické vodní hospodářství. Pokud by se voda z článku odpařovala příliš pomalu, zaplavila by membránu a způsobila by znemožnění toku kyslíku, naopak pokud by se voda odpařovala příliš rychle, výrazně by se zvýšil odpor membrány. Oby případy tedy v podstatě znemožňují správné fungování palivového článku. Membrána je také velmi citlivá na ionty obecných kovů, které ji blokují, proto je nutné využití platinových katalyzátorů, což zvyšuje cenu PEM článku. Další nevýhodou je požadavek na vysokou čistotu paliva. [1][3][7][8]

3.1.2 Palivový článek s alkalickým elektrolytem (AFC)

AFC (Alkaline Fuel Cell) je jeden z prvních moderních palivových článků, uplatnění našel hlavně v kosmickém výzkumu a dopravě.

Palivový článek s alkalickým elektrolytem (obrázek 3.2) tvořen dvěma porézními elektrodami, které odděluje alkalický roztok KOH (hydroxid draselný), sloužící jako elektrolyt. Výhodou použití hydroxidu draselného je jeho velmi efektivní odvádění tepla, proto může tento palivový článek pracovat při nízké teplotě (20-90 °C). Jako okysličovadlo se používá kyslík nebo vzduch, jež je ovšem nutný zbavit oxidu uhličitého, který v hydroxidech tvoří málo rozpustné uhličitany, které vedou ke zvýšení odporu elektrolytu, zanášení pórů a v konečném důsledku tedy snižování účinnosti.



Obrázek 3.2 Palivový článek s alkalickým elektrolytem (AFC) [6]

Reakci na anodě popisuje následující rovnice



reakci na katodě pak



Celková sumární reakce je tedy



Mezi výhody palivového článku s alkalickým elektrolytem patří nízká pracovní teplota, poměrně vysoká účinnost (při použití čistého vodíku přes 60 %), kompaktní rozměry, nízká hmotnost a také nízká cena.

Mezi jeho nevýhody naopak patří relativně malá životnost a citlivost na oxid uhličitý.[1] [8]

3.1.3 Palivový článek pro přímou reakci metanolu (DMFC)

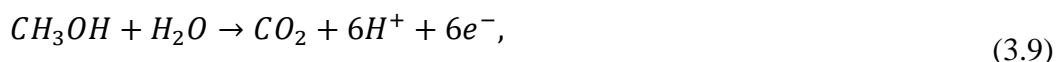
Narozdíl od předchozích dvou palivových článků, DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) nepoužívá jako palivo čistý vodík, ale metanol. Velkou výhodou metanolu je v jednoduchém skladování, transportu a tankování.

Metanol jako palivo je tedy vhodný pro aplikaci v malých elektrárnách, případně jako zdroje pro přenosnou elektroniku (mobilní telefony, notebooky, tablety...).

Naopak nevýhoda methanolu je mnohem pomalejší oxidace, což je způsobeno tím, že k ní dochází přes několik mezistupňů. Dalším problémem jsou fyzické vlastnosti metanolu a vody, kdy z anody přechází metanol přes membránu ke katodě, kde se spaluje bez využití. Tento efekt se nazývá *methanol cross-over* a snižuje napětí článku. Obě tyto nevýhody použití metanolu snižují účinnost článku k 30–40%.

Stejně jako u PEM článku, i zde je jako elektrolyt použita polymerní membrána, k platinovému katalyzátoru na anodě se přidává ruthenium, které chrání platinu před otravou meziprodukty, které vznikají během reakce. [1] [8]

Reakci na anodě popisuje následující rovnice



reakci na katodě pak



Sumární reakce je tedy



3.2 Středněteplotní palivové články

Pracovní teplota středněteplotních palivových článků se pohybuje v rozmezí 150 °C až 250 °C. Nejznámějším zástupcem této kategorie je palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC).

3.2.1 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) využívá jako elektrolyt kyselinu fosforečnou (H₃PO₄). Kyselý charakter elektrolytu odstraňuje problém s citlivostí článku na oxid uhličitý. Elektrody jsou grafitové s příměsí platiny, sloužící jako katalyzátor. Pracovní teplota PAFC se pohybuje v rozsahu 160-220 °C. Pokud by pracovní teplota výrazněji klesla,

kyselina fosforečná by ztratila svoji iontovou vodivost. Vyšší pracovní teplota způsobuje vyšší reakční rychlost proudotvorných reakcí, ale také nižší rovnovážné napětí článku. Další nevýhodou vyšší provozní teploty je pomalý start článku, kdy se musí nejprve přehřát na požadovanou teplotu. Z toho důvodu se nehodí pro použití v mobilních aplikacích. Jako palivo se používá vodík.

PAFC článek nachází využití, především díky nižší ceně, jako zdroj elektrické energie v oblastech s omezeným přístupem elektrické energie. Tyto soubory, složené z velkého množství jednotlivých článků, dosahují výkonů v řádech stovek kilowattů. [3][8]

3.3 Vysokoteplotní palivové články

Do kategorie vysokoteplotních palivových článků patří články s pracovní teplotou výrazně nad 250 °C. Nejznámější zástupci jsou palivové články s uhličitanovou taveninou, případně s pevným elektrolytem.

3.3.1 Palivový článek s uhličitanovou taveninou (MCFC)

MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) pracují v rozsahu teplot 600–700 °C, typicky 650 °C. Elektrolytem jsou taveniny alkalických uhličitánů, nejčastěji směs lithia, sodíku a draslíku. Tloušťka elektrolytické vrstvy určuje ztráty ohmickým odporem, proto je při konstrukci snaha tloušťku co nejvíce zmenšit a tím zvýšit účinnost. Také poměr jednotlivých kovů v elektrolytu značně mění jeho chování, např. vyšší obsah lithia zvyšuje iontovou vodivost, snižuje ohmické ztráty, ale zároveň způsobuje vyšší koroziivost a snižuje difuzivitu a rozpustnost plynu. Vzhledem k vysoké teplotě není nutné použití drahých kovů jako katalyzátoru.

Anodu obvykle tvoří slitina niklu a chromu nebo niklu a hliníku, katodu poté NiO (oxid nikelnatý) s příměsí lithia. Problém tohoto uspořádání bývá rozpustnost oxidu nikelnatého v tavenině tvořící elektrolyt. To může vést až ke zkratu.

Tyto palivové články nacházejí své uplatnění v průmyslu a ve vojenství za použití zemního plynu, případně oxidu uhelnatého jako paliva. Využití zemního plynu nebo oxidu uhelnatého umožňuje vysoká pracovní teplota článku, která umožňuje jejich přímou konverzi.

Vysoká pracovní teplota s sebou ovšem přináší problémy, jako například teplotní namáhání materiálů, nižší rovnovážné napětí nebo pomalý náběh článku. [3][8]

3.3.2 Palivový článek s pevným elektrolytem (SOFC)

SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) využívá jako elektrolyt iontově vodivý pevný materiál (oxid zirkoničitý stabilizovaný oxidy yttria). Použití pevného elektrolytu odstraňuje problémy typické pro elektrolyty kapalné, jako je např. koroze materiálu. Užití pevného elektrolytu také rozšiřuje možnosti finálního tvaru článku.

Pracovní teplota SOFC se pohybuje v rozsahu 800–1050 °C. Tato vysoká teplota s sebou nese problémy, stejně jako u MCFC, tzn. pomalý náběh, tepelné namáhání materiálů, nižší rovnovážné napětí článku.

Jako palivo se používá oxid uhelnatý, vodík nebo například produkty metanu. [3][8]

4. SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Jednou z největších výzev v procesu využívání vodíku jako paliva je jeho skladování. Ze všech používaných paliv má vodík nejmenší hustotu a také bod varu, což působí značné komplikace v jeho bezpečném a efektivním skladování. V současné době existuje více řešení, jak vodík skladovat. Od skladování v plynné fázi v tlakových nádobách, také v kapalně fázi, při relativně nízkých tlacích, ovšem při velmi nízkých teplotách, což vychází z teploty varu vodíku, která je $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Další a velmi zkoumanou možností je skladování vodíku v metalhydridových úložištích, které fungují na principu absorpce vodíku materiálu na bázi kovů.

Při porovnávání jednotlivých typů skladování vodíků se využívá tzv. hmotnostní kapacity (gravimetric density). Hmotnostní kapacita je definována jako poměr hmotnosti skladovaného vodíku a hmotnosti celého systému. Jelikož se jedná o poměr, tak se udává v procentech hmotnosti celého systému. [10]

4.1 Skladování vodíku v tlakových nádobách

Skladování vodíku v tlakových nádobách je dnes nejběžněji používanou technologií skladování. Při běžném tlaku a teplotě se hustota vodíku rovná $0,089\text{ kg/m}^3$. Z toho vyplývá, že jeden kilogram vodíku by při běžném tlaku a teplotě vyžadoval nádobu o velikosti přibližně 11 m^3 . Proto musí při skladování vodíku v plynné fázi dojít k jeho výraznému stlačení. Jako u každého plynu, i u vodíku dochází se stlačováním ke zvýšení tlaku a teploty. Aby se zabránilo přehřátí během plnění nádoby, musí se stlačený vodík ochlazovat. Běžným řešením je chlazení plynu ještě před vstupem do tlakové nádoby, tzn. umístění chladiče mezi kompresor a tlakovou nádobu.

Tlak vodíku se v případě skladování v tlakových nádobách pohybuje v rozmezí 350-700 barů. Technologický limit je 1000 barů. Pro statické aplikace se nejčastěji využívá bezešvých láhví z legované, případně nízkouhlíkaté, oceli. Objem těchto láhví bývá v rozmezí jednotek litrů až padesáti litrů.

V mobilních aplikacích (vozidla na vodíkový pohon) se užívá kompozitních nádob, jejichž vnitřní povrch je tvořen vrstvou kovu, případně speciálním polymerem, sloužící k zabránění úniku vodíku přes kompozitní povrch nádoby. Kompozitní nádoby se vyrábí v objemech od nižších desítek litrů do přibližně 300 litrů. [10] [11]

Například v automobilu na vodíkový pohon *Toyota Mirai 2019* jsou použity pro skladování vodíku právě kompozitní nádoby o objemu 60 a 62 litrů. Pracovní tlak se pohybuje kolem hodnoty 700 barů. Hmotnostní kapacita tohoto úložiště je 5,7%. Doba plnění je přibližně 5 minut, dojezd na jedno naplnění je udáván 480 km. [12]

4.2 Skladování vodíku v kapalně fázi

Základním požadavkem pro skladování vodíku v kapalně fázi je snížení jeho teploty na -253 °C (teplota varu vodíku při obvyklém tlaku), maximální tlak je 5 barů. Tyto podmínky vyžadují poměrně vysoké nároky na materiál, z kterého je úložiště vyrobené. Energie, která je potřebná pro převedení vodíku do kapalně fáze, může dosahovat až hodnot 40% energie, která je v nádobě uložená. Dalším problémem skladování vodíku v kapalně fázi je vliv přestupu tepla z okolí, kdy dochází k vypařování vodíku a následnému nárůstu tlaku. Aby se zabránilo destrukci nádoby, je součástí úložiště přetlakový systém, který přebytečný tlak upouští (ztráty se pohybují až v hodnotě 3% obsahu za den). U některých úložišť je použit systém přídavných tlakových láhví, které unikající vodík zachycují a dále využívají.

Technologie skladování vodíku v kapalně fázi nachází své využití převážně v dopravě vodíku na dlouhé vzdálenosti, z důvodu výrazně vyšší hustoty vodíku v kapalně formě než ve formě plynné, viz Tabulka 4.1 [10][11]

Tabulka 4.1 Hustota vodíku pro různá skupenství, teplotu a tlak [13]

Palivo	Hustota [kg/m^3]
Vodík 1 bar (plyn)	0,084
Vodík 250 bar (plyn)	17
Vodík 350 bar (plyn)	22,2
Vodík 700 bar (plyn)	39
Vodík -253°C (kapalina)	71,08

4.3 Skladování vodíku do metalhydridového úložiště

Skladování vodíku do metalhydridového úložiště patří mezi poměrně nové způsoby ukládání vodíku. Vodík se v metalhydridových úložištích skladuje při tlaku 3-30 barů, což je v porovnání s tlakovými nádobami násobně méně. Právě nízký tlak s sebou nese i vyšší bezpečnost tohoto řešení skladování vodíku. Systém funguje na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Při absorpci je vyvíjeno teplo (exotermní reakce). Atom vodíku je díky svému malému poloměru schopen proniknout mezi atomy metalhydridu. Při vybíjení vodíku z nádoby naopak je naopak nutno teplo dodávat (desorpce). [10]

4.3.1 Metalhydridy

Pro správnou funkci metalhydridového úložiště musí metalhydridy splňovat určité požadavky:

- vysokou kapacitu vodíku na jednotku hmotnosti a objemu,
- nízkou teplotu disociace (štěpení/rozpad molekul na ionty),
- průměrný tlak disociace,
- reverzibilita pro snížení ztráty energie při nabíjení a vybíjení vodíku,
- rychlá kinetika,
- vysoká odolnost proti vlivu kyslíku a vlhkosti pro dlouhou životnost úložiště,
- schopnost zvládnout co největší počet cyklů nabíjení/vybíjení bez poškození, případně snížení účinnosti,
- nízké náklady na recyklační a nabíjecí infrastrukturu,
- maximální bezpečnost.

Současné metalhydridy, vhodné pro využití v automobilovém průmyslu, mají hmotnostní kapacitu v rozmezí 0,5-2% hmotnosti celého systému. Více než padesát kovů z periodické soustavy prvků je schopno absorbovat vodík v uspokojivém množství, ovšem pouze část z nich jsou využitelné pro skladování vodíku při vhodném tlaku a teplotě. Dalšími aspekty, na které je nutné brát ohled při výběru metalhydridu, jsou hustota energie a entalpie vybíjení.

Při vybírání metalhydridu je třeba přistoupit na určitý kompromis. Pokud bude jeho úložná kapacita velká, lze očekávat pomalejší kinetiku. Při použití v automobilovém průmyslu je také nutné brát ohledy na objem a hmotnost úložiště. Maximální přípustná hmotnost a objem se pohybuje kolem 100 kg, respektive 100 litrů.

Kinetika v tomto případě označuje rychlost absorpce a desorpce vodíku. Rychlejší kinetika tedy, při určité teplotě a tlaku, znamená rychlejší nabíjení, respektive vybíjení vodíku z úložiště, při dodržení bezpečnostních podmínek. Rychlost kinetiky metalhydridů ovlivňuje povrch materiálu, který reaguje s vodíkem, rozměry povrchu a také jeho homogenita, respektive typy přísad a katalyzátorů na povrchu.

Kromě nízké hmotnosti a objemu úložiště je nutné také udržovat krátké doby cyklů nabíjení/vybíjení. Nejvíce limitujícím faktorem je odvod a přenos tepla, z důvodu nízké vodivosti kovových částic a také špatný přenos mezi částicemi a stěnou nádoby. Proto je nutné přidat přísady, které přenos tepla zlepšují a minimálně ovlivní funkci úložiště.

Nejpoužívanějšími metalhydridy jsou metalhydridy na bázi slitin železa, hořčíku, titanu a niklu. [11]

4.3.2 Využití a budoucnost metalhydridových úložišť

Výhodou metalhydridových úložišť je jejich poměrně malá velikost (přibližně třetina proti ostatním typům úložišť), také jejich provozní tlak je výrazně menší než u vysokotlakých nádob, proto se nabízí jejich využití v automobilovém průmyslu, problémem ovšem je jeho velká hmotnost a také poměrně malá hmotnostní hustota, tedy malá hustota energie vzhledem k hmotnosti celého úložiště (do 3,5%). Metalhydridové

úložiště jsou také citlivé na čistotu vodíku. V případě, že by se do úložiště nedodával vodík potřebné čistoty, metalhydrid by se mohl zanést nečistotami, a to by výrazně snížilo kapacitu úložiště. Přesto v sobě tato technologie nabízí velký potenciál a je možné, že se dalším vývojem stanou dominantní, především pak v mobilní aplikaci. Hlavní vývoj musí být cílen na snížení jejich ceny a hmotnosti, vyšší efektivitě, odolnosti a také snížení doby nabíjení. [11]

5. MĚŘENÝ SYSTÉM S PALIVOVÝM ČLÁNKEM

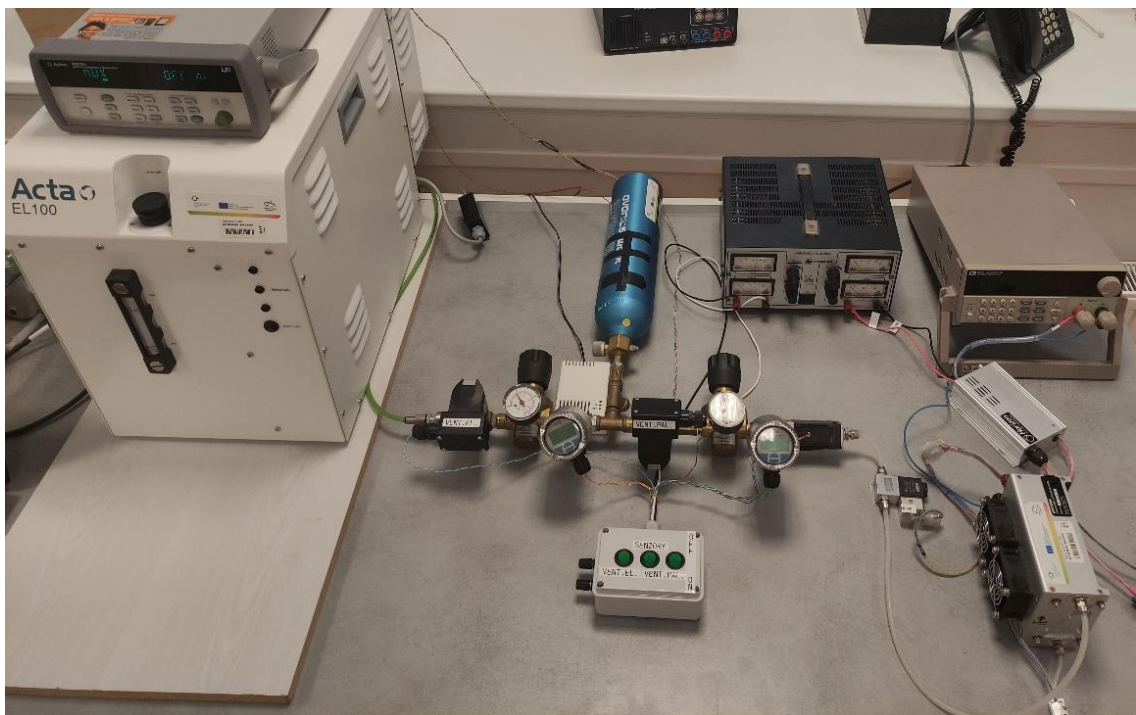
Měřený systém (obrázek 5.1) se dá pomyslně rozdělit do tří částí podle funkce daných komponent v celém systému.

První částí je výroba vodíku. Elektrolyzátor generuje vodík o požadované čistotě. Maximální pracovní tlak je 30 barů, ovšem optimální tlak pro nabíjení metalhydridového úložiště je 10 barů, proto je v systému umístěn redukční ventil, který omezuje tlak vodíku, vstupujícího do úložiště.

Druhou částí je právě ukládání vodíku do metalhydridového úložiště. Námi užitá metalhydridové úložiště má maximální kapacitu 760 litrů vodíku požadované čistoty (99,999%).

Třetí částí je samotná přeměna chemické energie vodíku na elektrickou energii pomocí palivového článku H-200 od výrobce Horizon. Tlak vodíku vstupujícího do článku se musí pohybovat v rozmezí 0,45-0,55 barů, proto je mezi úložištěm a palivovým článkem umístěn redukční ventil, pro redukci tlaku. Součástí systému je elektronická (aktivní) zátěž, která slouží pro měření charakteristik palivového článku.

Všechny tyto tři části zastřešuje měření a ovládání systému. Měření je z části automatizované pomocí programu vytvořeném v prostředí programu Labview, ovládání ventilů, elektrolyzátoru a palivového článku je manuální.



Obrázek 5.1 Měřený systém s palivovým článkem

5.1 Zprovoznění měřeného systému

Měřený systém je sestaven z komponent, které byly v daném okamžiku dostupné na Ústavu elektrotechnologie.

Před samotným sestavením systému proto bylo nutné nastudovat návody a technické listy dostupných komponent, zda a za jakých podmínek jsou pro dané užití vhodné. Pro měření průtoku s požadovanými parametry průtoku a tlaku byl k dispozici průtokoměr Omron D6F 10. Daný průtokoměr ovšem není určen pro měření vodíku, proto v systému není zapojen.

Elektrolyzér má vlastní tepelnou pojistku. Po dosažení teploty, která výrobcem není v návodu specifikována, se elektrolyzér vypne. Před měřením celého systému bylo zjištěno, že doba vypnutí přesahuje dvě hodiny, pokud elektrolyzér běžel daný den poprvé, tzn. jeho teplota odpovídala teplotě okolí. S touto znalostí také byl zvolen časový interval běhu elektrolyzéro pro měření účinnosti systému a závislosti tlaku na teplotě úložiště při nabíjení. Při prvním spuštění elektrolyzéro bylo nutné doplnit destilovanou vodu, její spotřeba udávaná výrobcem (0,1 litrů za hodinu) přibližně odpovídá reálnému provozu. Destilovanou vodu je možné doplňovat i za provozu.

Elektromagnetické ventily a tlakoměry, dostupné na Ústavu elektrotechnologie, byly pro danou aplikaci vhodné, jediným drobným problémem bylo rozdílné napájecí napětí ventilů a tlakoměrů, které je 24 V a řídicí jednotky palivového článku, které je 13 V. Řešením bylo využití zdroje se dvěma nastavitelnými výstupy.

Problematickou součástí systému se ukázal palivový článek, který po dlouhou dobu nebyl v provozu. Článek je typu PEMFC, kde je jako elektrolyt využita polymerní membrána, která vyžaduje přesně dané zvlhčení. Výrobce v návodu [9] doporučuje běh článku alespoň jednou za měsíc, aby nedošlo k postupné degradaci membrány. Tato podmínka nebyla rozhodně nebyla splněna. Při prvním spuštění proto dosáhl výkon palivového článku pouze 0,8 W. Zvyšování maximálního výkonu probíhalo z počátku velmi mírně. Po asi pěti hodinách běhu se výkon zvýšil o pouhé jednotky Wattů. Pro flexibilnější ovládání zátěže byla elektronická zátěž dočasně nahrazena odporovou dekádou. Po dosažení hodnoty kolem 15 W začal maximální výkon palivového článku růst rychleji, se zvyšujícím se výkonem se zrychlovalo i zvlhčování membrány. Námi zjištěné maximální hodnoty výkonu (107 W) dosáhl palivový článek až po desítkách hodin chodu. Přesto je maximální výkon palivového článku (107 W) výrazně nižší, než udává výrobce (200 W). Důvodem je pravděpodobně stáří palivového článku a s tím související degradace membrány.

5.2 Ovládání a měření systému

Obrázek 5.2 zobrazuje blokové schéma sestaveného systému. Barvy propojovacích čar odpovídají barvě textu v legendě. Černá značí cestu vodíku, začíná výstupem z elektrolyzáru pokračuje přes elektromagnetický a redukční ventil do metalhydridového úložiště. Následuje tlakoměr, který měří tlak v úložišti. Úložiště má navíc svůj vlastní mechanický ventil pro uzavření průtoku vodíku. Vodík dále pokračuje přes další elektromagnetický a redukční ventil. Tlak vodíku vstupujícího do palivového článku hlídá tlakoměr. Tlak se musí pohybovat v rozmezí 0,45-0,55 barů.

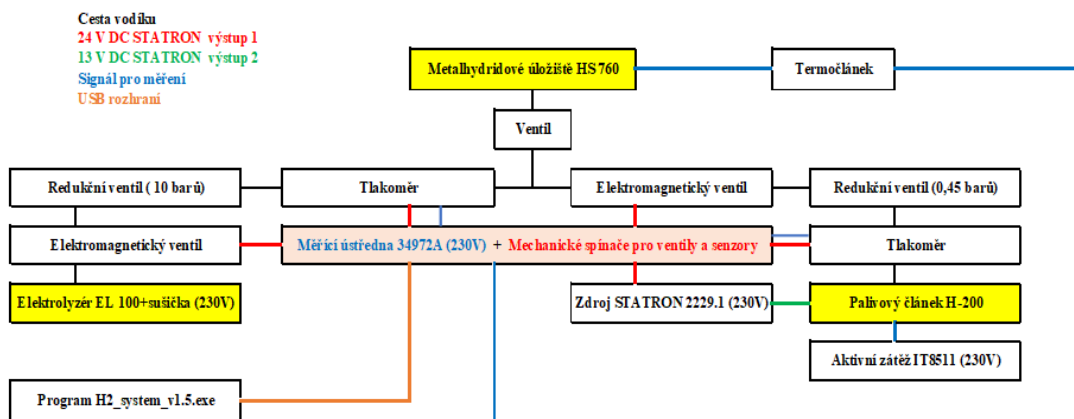
Tlakoměry a elektromagnetické ventily jsou napájeny ze zdroje STATRON 2229.1 a to stejnosměrným napětím 24 V. v blokovém schématu je toto napájení označeno červeně.

Palivový článek vyžaduje externí napájení a to stejnosměrných 13 V. Je využit druhý výstup zdroje STATRON 2229.1. Ve schématu znázorněno zeleně.

Modře jsou znázorněny měřené signály. Tlakoměry mají proudový výstup 4-20 mA. Termočlánek má napěťový výstup. Napětí a proud palivového článku měří aktivní zátěž IT8511.

Měřicí ústředna 34972A komunikuje s programem H2_system_v1.5.exe pomocí USB rozhraní. Ve schématu znázorněno oranžovou barvou.

Na měřeném systému probíhalo paralelně měření bakalářské práce *Ukládání elektrolyzou získaného vodíku do metalhydridového úložiště* od Lukáše Hamříka, proto je systém navržen a sestaven tak, aby vyhovoval pro obě zadání bakalářských prací, a to včetně vytvořeného programu pro zpracování měření.



Obrázek 5.2 Blokové schéma měřeného systému

Pro ovládání elektromagnetických ventilů a pro zapnutí senzorů byl navrhnout jednoduchý blok jednopólových vypínačů, který je napájen ze zdroje STATRON 2229.1. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu jednoduché obsluhy a případného rychlého vypnutí přísunu vodíku při hraničních situacích. Dále jsou z boku k dispozici dva kontakty pro připojení dalšího senzoru se stejnosměrným napájením 24 V. Například pro připojení průtokoměru.



Obrázek 5.3 Blok spínačů pro ovládání systému

5.2.1 Měřicí ústředna 34972A

Pro vyhodnocení signálů z tlakoměrů a termočládku je využita měřicí ústředna Agilent 34972A (obrázek 5.4) společně se zásuvným modulem 34901A. Měřicí ústředna je takto schopna měřit až 22 kanálů, a to s rychlostí přepínání 60 kanálů za sekundu. Dva kanály jsou proudové, které jsou schopny trvale snášet proud až 1 A a zároveň ho zvládají měřit. Právě tyto dva poslední kanály (121 a 122) jsou využity pro měření proudu z tlakoměrů. Tyto proudy jsou následně v programu H2_system_v1.5.exe přepočítány na tlak. Kanál 101 je využit pro měření teploty, kdy samotná měřicí ústředna přepočítává hodnoty napětí termočládku na teplotu.



Obrázek 5.4 Měřicí ústředna Agilent 34972A

5.2.2 Program pro měření systému

Jak již bylo uvedeno výše, pro zpracování měření se využívá program, vytvořený v prostředí Labview, H2_system_v1.5.exe. Program využívá plug & play driver pro měřicí ústřednu Agilent 34972A volně dostupný z webu výrobce programu Labview National Instruments. [17].

Výstupem tlakoměrů je proud v rozmezí 4-20 mA. Abychom byli schopni zobrazovat přímo hodnotu tlaku je nutné hodnoty proudu přepočítat. Na základě informací z technického listu tlakoměrů je metodou lineární interpolace nutné hodnotu proudu přepočítat dle rovnice

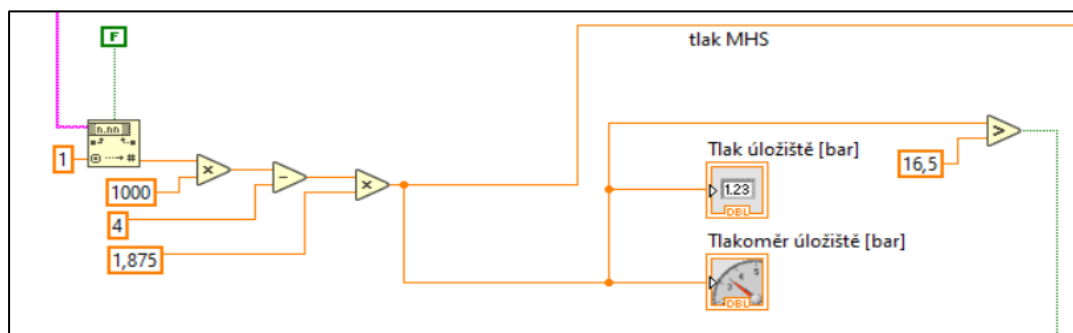
$$(I - 4) \cdot 1,875, \quad (5.1)$$

pro tlakoměr měřící tlak v úložišti a dle rovnice

$$(I - 4) \cdot 0,15625, \quad (5.2)$$

pro tlakoměr měřící tlak vstupující do palivového článku, kde I je pro obě rovnice proud tlakoměru v miliampérech.

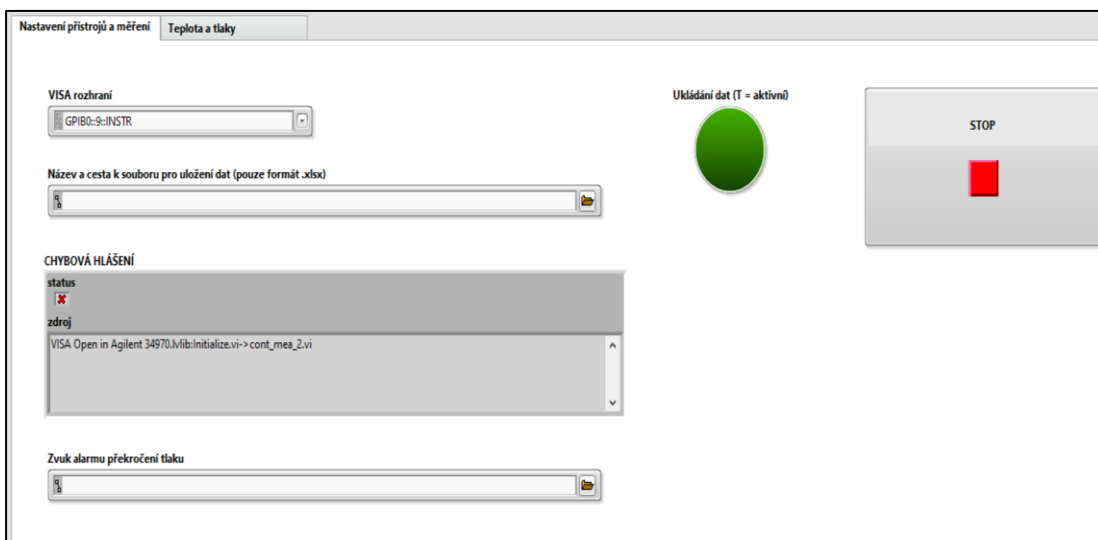
Přepočet hodnoty proudu na tlak v úložišti v programu je uveden na obrázku níže.



Obrázek 5.5 Přepočet proudu na tlak v programu pro měření

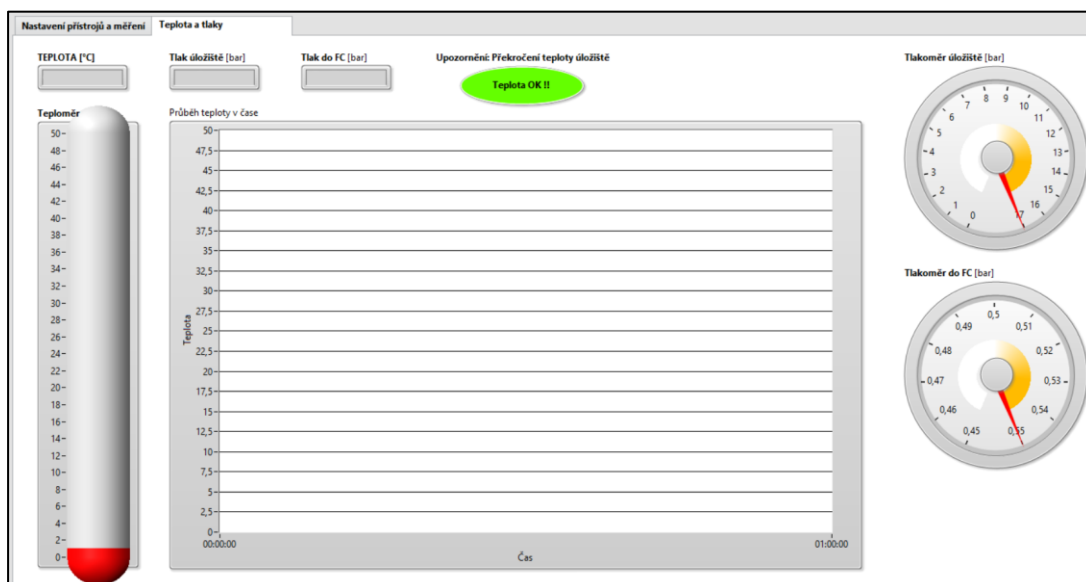
První obrazovka programu (obrázek 5.6) souvisí s nastavením. Nejprve je nutné vybrat rozhraní, přes které bude probíhat komunikace mezi ústřednou a programem. Program je přizpůsoben pro komunikaci přes rozhraní USB. Dále je nutné vybrat cestu k souboru, kam se budou ukládat měřená data. Musí se jednat o soubor s příponou .xlsx. Je také možné zvolit zvuk varování při překročení tlaku nádoby.

Obrazovka také obsahuje část, kde se zobrazují chybová hlášení, zelená dioda signalizuje korektní zapisování měřených dat do souboru. Červeným stop tlačítkem dojde k ukončení měření bez hrozby ztráty naměřených dat. Naměřené hodnoty teploty a tlaku jsou poté zapsány v souboru dle uživatelem zadané cesty.



Obrázek 5.6 Nastavení přístrojů a měření

Druhá obrazovka programu (obrázek 5.7) se věnujeme samotnému měření. Program zobrazuje poslední změřenou hodnotu teploty, tlaku v úložišti a tlaku vstupujícího do palivového článku. Tlaky zobrazuje také na imitaci analogového zobrazení, a to z důvodu přehledného zobrazení tlaku s ohledem na dovolené meze systému (maximální tlak v úložišti je 17 barů a tlak vstupující do palivového článku se musí pohybovat v rozmezí 0,45-0,55 barů). Zobrazuje také průběh teploty úložiště v čase a signalizuje případné překročení povolené teploty úložiště.



Obrázek 5.7 Měření teploty a tlaku

Měření hodnot a jejich zápis probíhá v intervalu 10 sekund. Jedná se o určitý kompromis, který zajišťuje bezproblémovou komunikaci měřicí ústředny a programu, přepnutí kanálu v měřicí ústředně a odečtení hodnoty. Zároveň je interval dostatečně krátký, aby při požadovaném měření nenarušil výslednou měřenou závislost.

5.3 Výroba vodíku pomocí elektrolyzáru EL 100

Pro generování vodíku se využívá elektrolyzáru EL 100 od výrobce Acta. Z destilované vody je schopen dodávat až 100 litrů vodíku za hodinu při pracovním tlaku 30 barů. Spotřeba destilované vody je 0,1 litru za hodinu. Elektrolyzáru je schopný dodávat vodík o čistotě 99,94%, což by pro ukládání do metalhydridového uložení nestačilo, proto je doplněn sušičkou, která je také od výrobce Acta a která je pro tento typ elektrolyzáru přímo určena. Tato kombinace zaručuje dostatečnou čistotu vodíku pro ukládání vodíku do metalhydridového uložení HS760 (požadavek na čistotu vodíku 99,999%). Na přední straně elektrolyzáru jsou signalizační diody, které zobrazují stav elektrolyzáru. Dále je zde zobrazeno množství destilované vody v elektrolyzáru. Příkon elektrolyzáru je 580 W a příkon sušičky je 200 W. [16]



Obrázek 5.8 Elektrolyzáru ACTA EL100

5.4 Ukládání vodíku do metalhydridového úložiště HS760

V měřeném systému je využito metalhydridové úložiště HS760 od výrobce Heliocentris. Tabulka 5.1 obsahuje technické specifikace metalhydridového úložiště tak, jak je uvádí výrobce v oficiálním manuálu k úložišti [14]

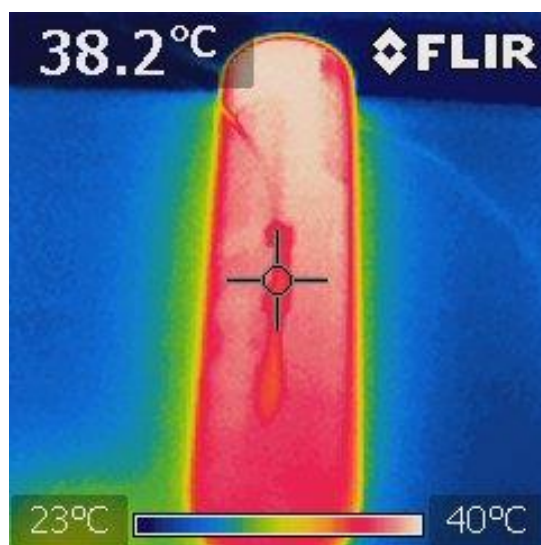
Tabulka 5.1 Technické specifikace HS760

Specifikace plynu	Čistý vodík, čistota min. 5 (99,999%)
Kapacita při tlaku 17 bar	760 l
Kapacita při tlaku 10 barů	500 l
Tlak při vybíjení	Přibližně 8 barů při 20 °C
Maximální teplota úložiště	+50°C
Doporučený tlak při nabíjení	10 barů při 20°C
Maximální tlak při nabíjení	17 barů
Rozměry	89 x 420 mm
Hmotnost	6,5 kg



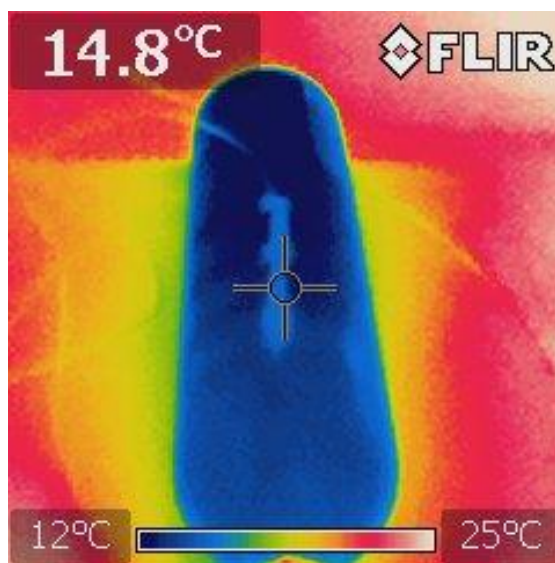
Obrázek 5.9 Metalhydridové úložiště HS760

Jak již bylo uvedeno v teorii o metalhydridových úložištích, tlak v úložišti je výrazně závislý na teplotě metalhydridového úložiště. Při nabíjení dochází k výraznému zahřátí úložiště, jak dokládá snímek pořízený termokamerou FLIR (obrázek 5.10)



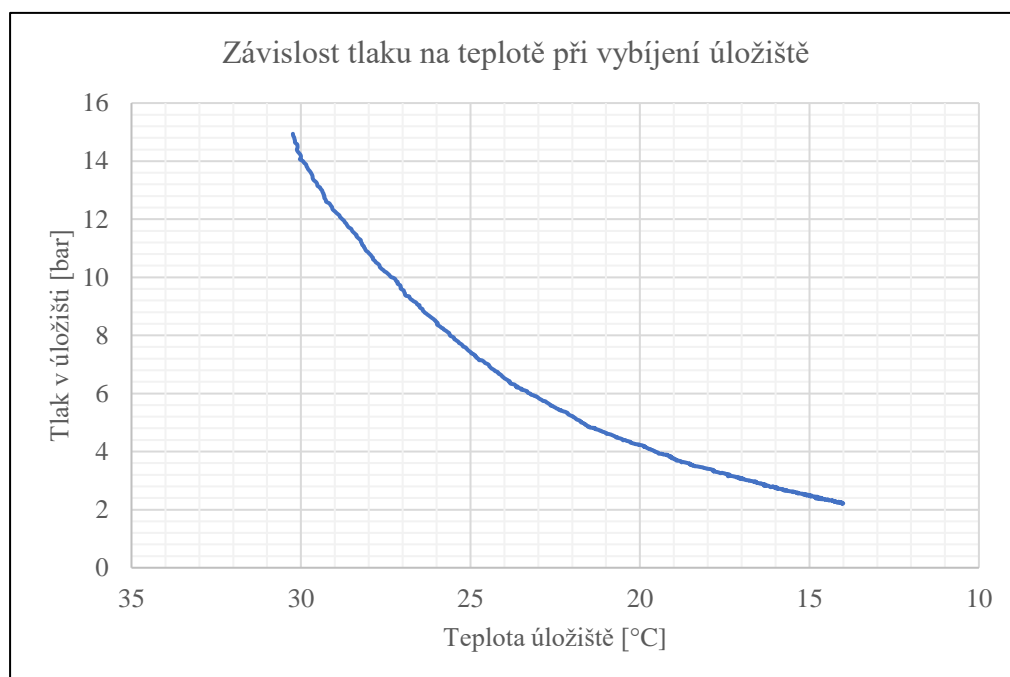
Obrázek 5.10 Metalhydridové úložiště při nabíjení

Naopak při vybíjení dochází se snižujícím se tlakem v úložišti k výraznému poklesu teploty úložiště (obrázek 5.11).



Obrázek 5.11 Metalhydridové úložiště při vybíjení

Pomocí navrženého programu byla změřena závislost tlaku v úložišti na teplotě (obrázek 5.12). Závislost přesně potvrzuje teoretické předpoklady. Se zmenšující se teplotou výrazně klesá i tlak v úložišti. Takto rychlý pokles teploty a tlaku může značně omezit možnosti využití těchto úložišť. Měření bylo prováděno při teplotě okolí 22,1 °C. Vybíjení úložiště začalo ihned po jeho nabití, kdy teplota úložiště dosahoval hodnoty 30,3 °C a trvalo 128 minut. Odečítání hodnot teploty a tlaku probíhalo v intervalu 10 sekund.



Obrázek 5.12 Závislost tlaku na teplotě při vybíjení úložiště

5.5 Palivový článek H-200

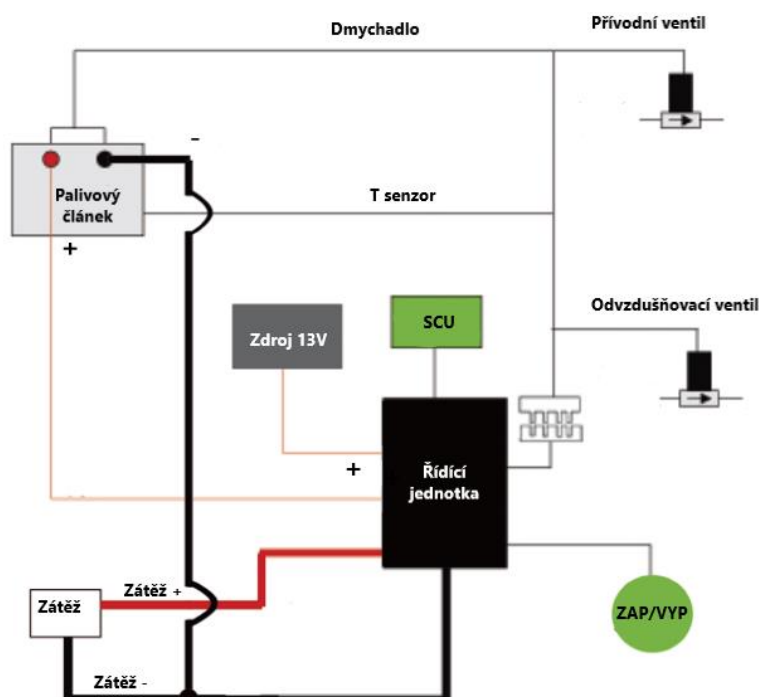
Palivový článek, který se nachází na Ústavu elektrotechnologie, je typu H-200 od výrobce Horizon (obrázek 5.13). Jedná se o soubor celkem 48 PEM článků, pracující při tlaku 0,45-0,55 barů. Jeho maximální výkon je 200 W. K jeho zprovoznění a samotné práci článku je třeba připojit externí napájení (12-14V).



Obrázek 5.13 Palivový článek H-200 [9]

Celé zařízení se neskládá pouze ze samotného souboru palivových článků, ale také z dalších komponent nutných pro správnou funkci. Kompletní zapojení celého zařízení je uvedeno na obrázku 5.14. Zapojení ukazuje, že řídicí jednotka je pro provoz palivového článku nenahraditelná, přes konektor jsou do ní zapojeny výstupy od přívodního ventilu, odvzdušňovacího ventilu, T senzoru, dmychadla. Ovládá také SCU, které slouží k zvýšení výkonu palivového článku. Jednotlivé komponenty jsou následně ukázány na obrázku 5.15. Čísla v obrázku odpovídají číslům v závorkách u názvu komponenty v seznamu níže.

Tabulka 5.2 obsahuje souhrn technických specifikací palivového článku, uvedených v oficiální manuálu palivového článku H-200. [9]



Obrázek 5.14 Zapojení palivového článku včetně řídicí jednotky [9]

Řídicí jednotka (1)

Kontroluje přísun vodíku do palivového článku, jeho teplotu a reguluje ventilátory pro chlazení článku. Měří výstupní napětí a proud a vypíná článek při příliš vysoké hodnotě proudu nebo naopak nízké hodnotě napětí.

Přívodní ventil (2)

Slouží pro kontrolu přívodu vodíku. Elektronicky je ovládán řídicí jednotkou. Když je řídicí jednotka zapnuta, je spuštěn přívod vodíku do článku. Když ji vypneme, zavře se přívodní ventil, aby nedošlo k úniku vodíku.

Odvzdušňovací ventil (3)

Odvádí přebytečnou vodu a vzduch z palivových článků.

Dmychadlo (4)

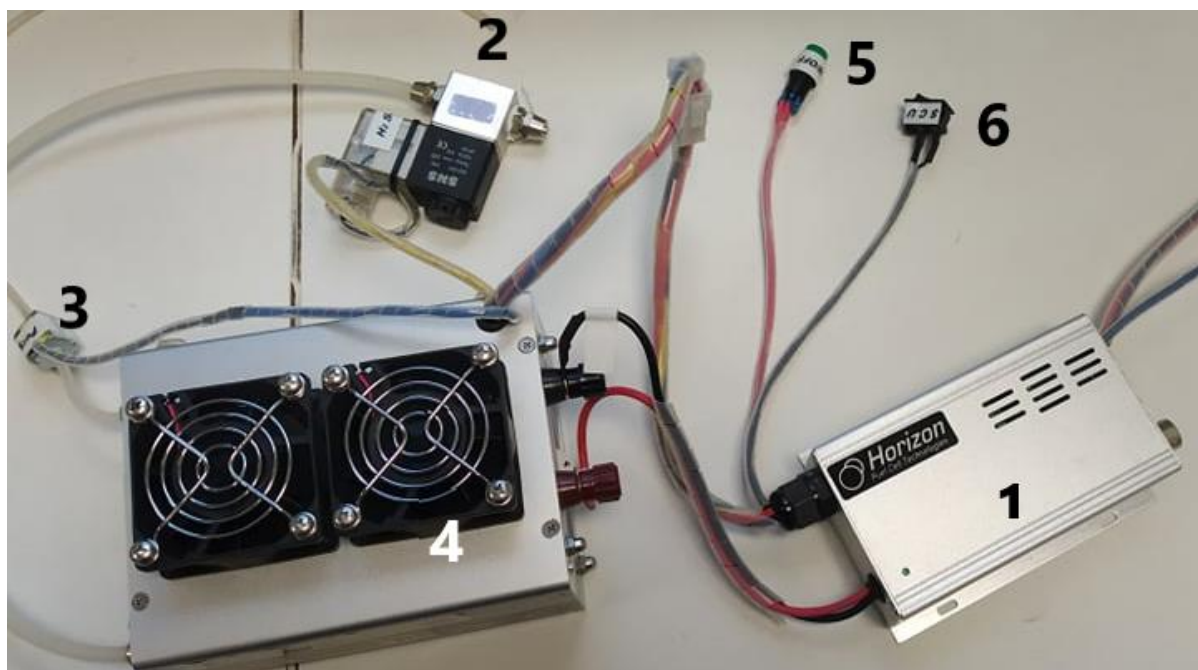
Dodává vzduch palivovým článkům a zároveň snižuje teplotu celého souboru článků.

Vypínač zap/vyp (5)

Slouží k vypnutí/zapnutí systému. Pro změnu stavu je nutné držet tlačítko po dobu dvou sekund

SCU - Short Circuit Unit (6)

Zajišťuje nejlepší možný výkon palivového článku



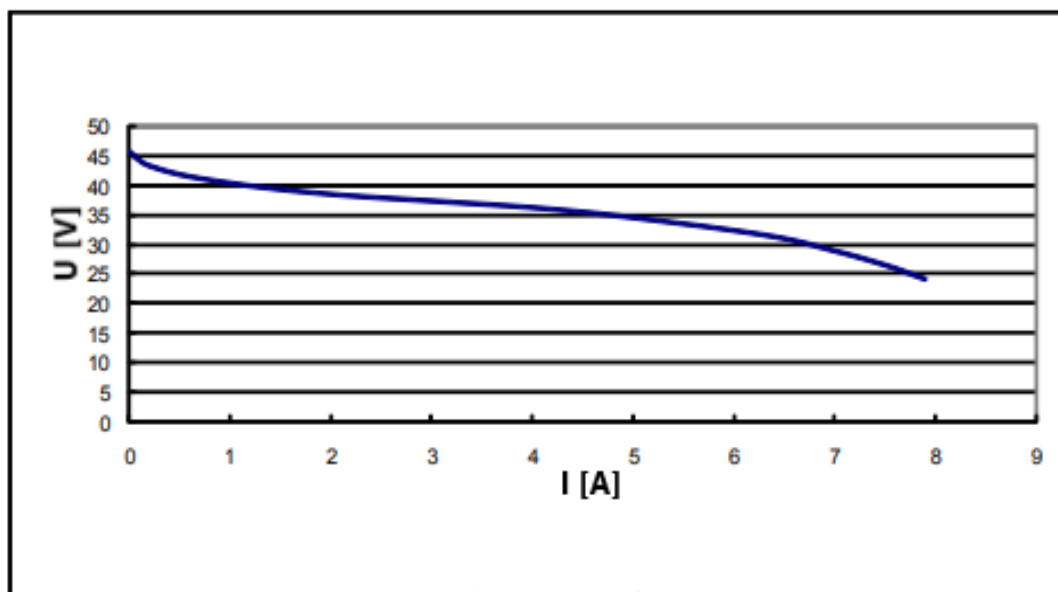
Obrázek 5.15 Palivový článek a příslušné komponenty

Tabulka 5.2 Technické specifikace H-200

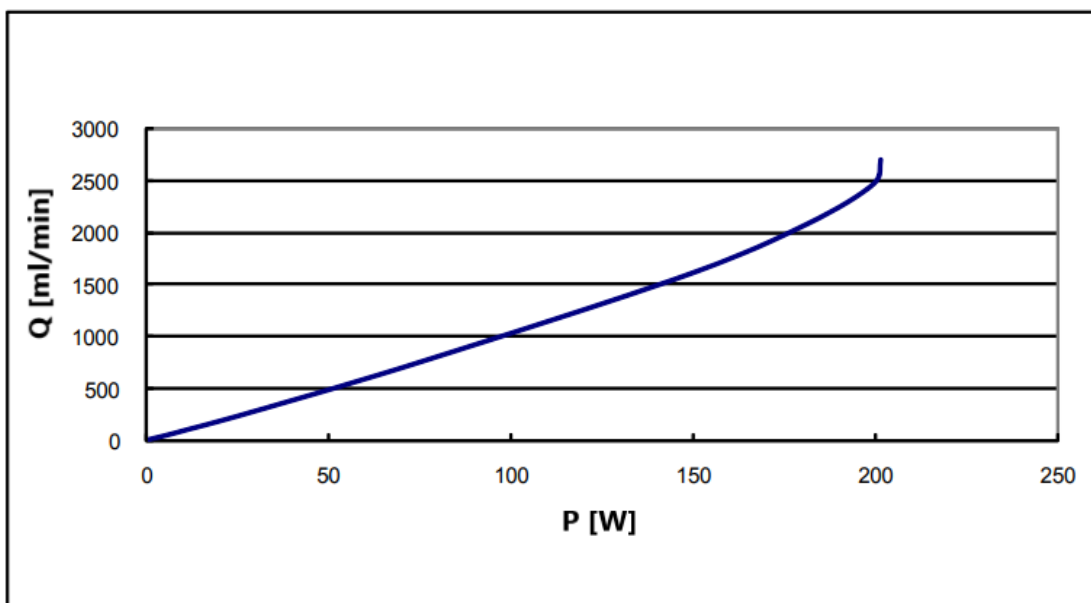
Typ palivového článku	PEM
Počet palivových článků	48
Jmenovitý výkon	200 W
Výkon	28,8 V při 7,2 A
Napájení přívodního ventilu	12 V
Napájení odvětrávacího ventilu	12 V

Napájení dmyhadla	12 V
Reaktanty	Vodík a vzduch
Teplota okolí	5-30 °C
Maximální teplota článku	65 °C
Tlak vodíku	0,45-0,55 barů
Čistota vodíku	99,995 %
Zvlhčování membrány	Samo-zvlhčována
Chlazení	Vzduchem
Průtok při maximálním zatížení	2,8 l/min
Čas náběhu	≤30 s v závislosti na teplotě okolí
Účinnost	40% při 28,8 V
Hranice vypnutí při přehřátí	65 °C
Externí napájecí zdroj	13 V (±1V), <5 A

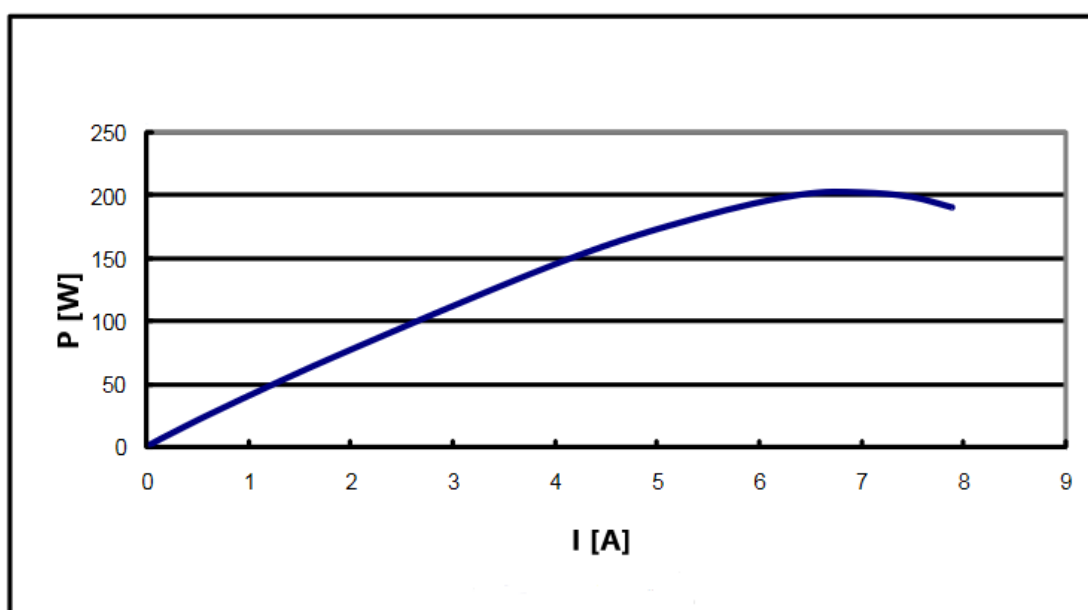
Výrobce také uvádí voltampérovou charakteristiku palivového článku (obrázek 5.16), závislost průtoku vodíku (spotřeby) na výkonu palivového článku (obrázek 5.17) a jeho výkonovou závislost na výstupním proudu. (obrázek 5.18)



Obrázek 5.16 Voltampérová charakteristika palivového článku H-200 [9]



Obrázek 5.17 Závislost průtoku vodíku na výkonu palivového článku H-200 [9]



Obrázek 5.18 Závislost výkonu palivového článku na výstupním proudu [9]

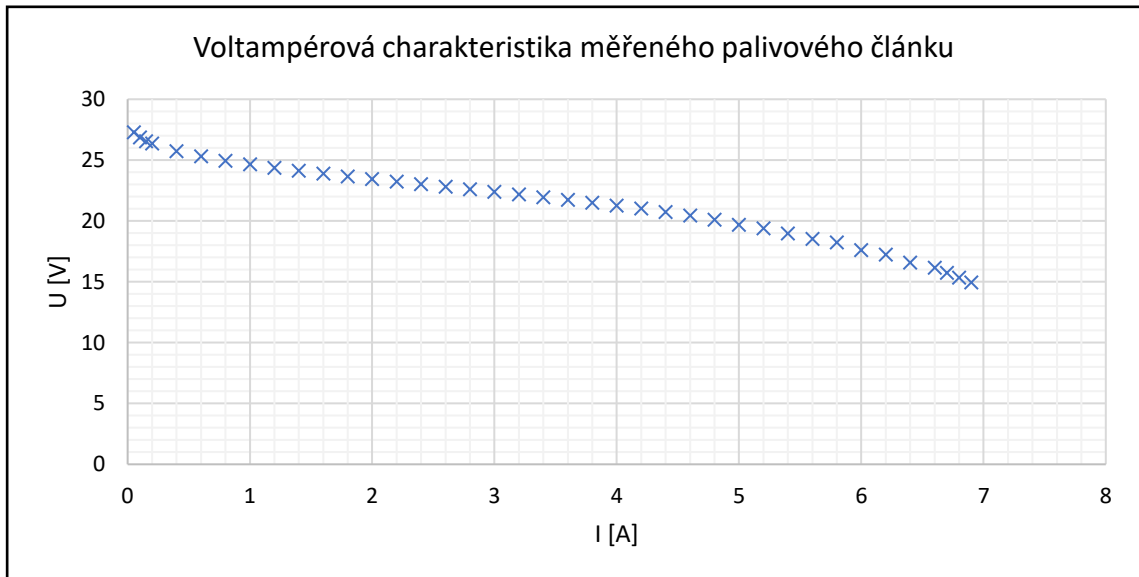
Pomocí aktivní zátěže IT8511 byla proměřena voltampérová charakteristika (obrázek 5.19) a také závislost výkonu na výstupním proudu (obrázek 5.20).

Tvarově odpovídají tyto charakteristiky charakteristikám udaných výrobcem a také teoretickým předpokladům uvedené v teoretické části (2.2 Měření palivového článku). V první části sledujeme pokles napětí způsobený ztrátami aktivační polarizace, ve druhé části je pokles prakticky lineární a je způsoben ohmickými ztrátami a v poslední části

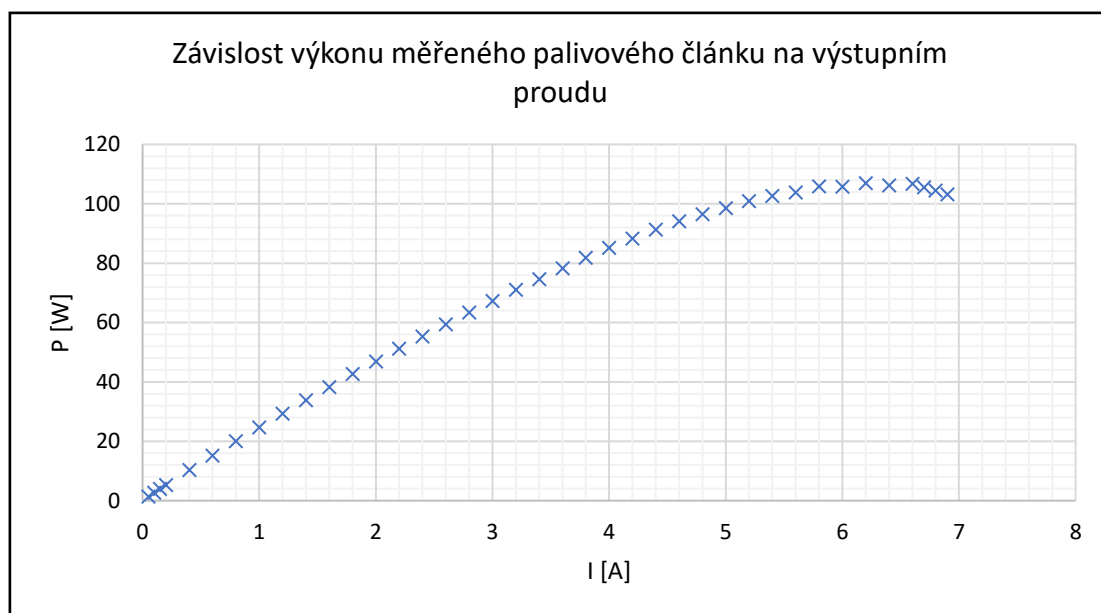
dochází k nedostatečnému transportu látky do článku, vodík je spotřebováván rychleji, než je dodáván.

Samotné hodnoty napětí pro jednotlivé proudy a také výkonu jsou nižší. Palivový článek nebyl dlouhou dobu využíván, membrána nebyla zvlhčována a došlo k její degradaci. Maximálního výkonu 107 W dosahuje palivový článek při proudu 6,2 A a napětí 17,3 V. Výrobce udané hodnoty maximálního výkonu palivového článku 200 W by měl palivový článek dosáhnout při výstupním proudu 7,2 A a napětí 28,8 V. Proud 7,2 A není schopný palivový článek dosáhnout, protože řídicí jednotka palivový článek kvůli nízkému napětí odpojí.

Závislost výkonu na průtoku vodíku bohužel nebylo možné změřit. Průtokoměry na Ústavu elektrotechnologie buď nebyly určeny pro měření průtoku vodíku nebo měly maximální hodnotu průtoku nízké stovky mililitrů za minutu, což by podle charakteristiky (obrázek 5.17) sice stačilo na měření průtoku pro malé výkony, ovšem dalším problémem zůstává samotné fungování řídicí jednotky palivového článku, která přísun vodíku kontroluje. Přísun vodíku funguje v intervalu deseti sekund tak, že řídicí jednotka otevře přívodní ventil asi po dobu jedné sekundy a během této doby protéká vodík do palivového článku, zbylých devět sekund je přívodní ventil zavřený. Nominální hodnota průtoku je tedy v této jedné sekundě vysoká i pro malé výkony a mohlo by dojít k poškození dostupných průtokoměrů.



Obrázek 5.19 Voltampérová charakteristika měřeného palivového článku



Obrázek 5.20 Závislost výkonu měřeného palivového článku na výstupním proudu

6. PROVOZNÍ REŽIM MĚŘENÉHO SYSTÉMU

V předchozí kapitole byly popsány jednotlivé části sestaveného systému a byly proměřeny charakteristiky palivového článku a metalhydridového úložiště. Tato kapitola se věnuje systému komplexně.

6.1 Režim nabíjení/vybíjení úložiště

Nejčastější využití takového systému je pravděpodobně v naakumulování energie ve formě vodíku do úložiště, jeho uložení po nějaký čas a následně chemickou energii vodíku přeměnit v palivovém článku na energii elektrickou. Pro toto využití je tedy vhodné spočítat účinnost celého systému. Při tomto výpočtu uvažujeme se základním vztahem:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}}, \quad (6.1)$$

kde účinnost η je podílem energie ze systému vystupující E_{out} a energie do systému vstupující E_{in} . Pro měření byl využit měřič spotřeby STEINNER ENM 100.

Dalším předpokladem musí být ustálení teploty úložiště po nabíjení a vybíjení. Nabíjení úložiště bylo zahájeno při teplotě okolí úložiště (21,2°C) a při tlaku úložiště 3,85 barů. Nabíjení trvalo 90 minut, teplota úložiště se zvedla na 38,62°C a tlak v úložišti vystoupal na 15,35 barů. Po ustálení teploty úložiště na teplotu okolí klesl tlak v úložišti na 5,13 barů. Energie do systému dodaná byla $E_{in}=1250$ Wh. Do této hodnoty je připočítána i energie potřebná pro měření a ovládání systému. Z důvodu bezpečnosti je žádoucí hlídat a měřit chování celého měřeného systému. Také je k ní připočtena energie, která se následně využije pro napájení řídicí jednotky palivového článku.

Po ustálení teploty došlo k vybíjení úložiště a spotřebovávání vodíku v palivovém článku, dokud tlak v úložišti při teplotě okolí neodpovídal hodnotě 3,85 barů. Výstupní energie $E_{out} = 116$ Wh.

Dosazením do vzorce (6.1):

$$\eta = \frac{116}{1250} = 0,0928. \quad (6.1)$$

Účinnost systému je tedy 9,28%. Důvodem nižší účinnosti systému je pravděpodobně částečná degradace palivového článku. Výrobce uvádí, že při maximálním výkonu je jeho účinnost 40%. Na maximální výkon se ovšem palivový článek není schopný dostat, jak je popsáno v kapitole 5.5. Výrobce elektrolyzéry účinnost neuvádí, obecně se uvažuje, že se pohybuje mezi 80-90% v našem případě budeme vzhledem ke stáří systému uvažovat nižší hranici. Pokud započítáme energii potřebnou pro ovládání a měření systému, dá se odhadnout účinnost palivového článku v rozmezí 10-20%. Jedná se pouze o odhad, pro přesnější výpočet by bylo nutné zapojení průtokoměrů a na základě naměřených průtoků změřit množství vodíku.

Problematickou částí tohoto provozního režimu je také právě metalhydridové úložiště a jeho závislost teploty a tlaku. Při vybíjení z teploty okolí poměrně výrazně klesá teplota úložiště, pro delší běh systému by tedy bylo nutné teplo dodávat a tím by ještě více snížila celková účinnost.

6.2 Kontinuální běh elektrolyzéro a palivového článku

Jedním z možných provozních režimů je kontinuální běh elektrolyzéro a palivového článku. Při tomto režimu slouží metalhydridové úložiště jako akumulátor, a to především z důvodu funkce řídicí jednotky palivového článku. Přísun vodíku funguje v intervalu deseti sekund tak, že řídicí jednotka otevře přívodní ventil asi po dobu jedné sekundy a během této doby protéká vodík do palivového článku, zbylých devět sekund je přívodní ventil zavřený, vodík se tedy akumuluje do úložiště.

Při nižších výkonech dochází k nabíjení nádoby. Do úložiště se ovšem dostává pouze část vyrobeného vodíku a úložiště se tolik nezahřívá. Elektrolyzéro má vlastní teplotní pojistku, po dosažení výrobcem určené teploty elektrolyzéro se vypne dodávání vodíku, v tomto případě je úložiště schopné plně nahradit funkci elektrolyzéro. Elektrolyzéro po určité době, kdy dojde k jeho zchlazení, opět začne dodávat vodík do systému.

Při vyšších výkonech (100 W) je množství vodíku dodávaného elektrolyzéro do systému prakticky shodné s množstvím vodíku odebíraným palivovým článkem. Po vypnutí elektrolyzéro je tedy nutné odebírat vodík z úložiště. Tento stav je dlouhodobě neudržitelný, protože vodík se během doby běhu nestačí do úložiště dobíjet v takovém množství, aby při chlazení elektrolyzéro úložiště plně nahradilo funkci elektrolyzéro.

7. ZÁVĚR

Bakalářská práce se věnovala problematice palivových článků a také skladování vodíku. Stručně byla popsána historie vývoje palivových článků. Byl popsán jejich princip, rozdělení a také jednotlivé typy se zaměřením na nízkoteplotní palivové články, konkrétně pak na článek s polymerní membránou (PEMFC).

Dále bylo popsáno skladování vodíku, konvenční metody skladování (skladování v plynné fázi ve vysokotlakých nádobách, skladování v kapalně fázi) a také metoda ukládání vodíku do metalhydridových úložišť, které bylo věnováno nejvíce prostoru.

Práce se věnovala návrhu vodíkového systému. Jeho součástí je elektrolyzátor pro generování vodíku, metalhydridové úložiště pro jeho skladování, palivový článek a potřebné ventily a měřáky pro bezproblémový chod. K systému byl v prostředí Labview vytvořen program pro měření tlaků vodíku v systému a teploty úložiště. Součástí práce je také jeho popis a návod pro spuštění měření. Dále bylo zkonstruováno mechanické ovládání systému.

U palivového článku H-200 byla změřena voltampérová charakteristika a také závislost výkonu palivového článku na proudu. Před samotným měřením bylo nutné palivový článek oživit, vzhledem k dlouhé době nečinnosti nebyla membrána zvlhčena a palivový článek byl schopen dodávat výkon o nízkých hodnotách jednotek wattů. Samotné oživování palivového článku bylo z praktické části časově nejnáročnější a zabralo desítky hodin postupného zvyšování proudu palivového článku. Naměřené charakteristiky byly porovnány s charakteristikami od výrobce a byly diskutovány příčiny rozdílných hodnot. Vzhledem k dlouhodobému nepoužívání článku došlo k jeho degradaci a maximální výkon je prakticky poloviční proti hodnotě udávané výrobcem.

Bylo pozorováno chování metalhydridového úložiště při vybíjení. Pomocí navrženého programu byla změřena závislost tlaku na teplotě úložiště. Tlak klesá s teplotou přibližně exponenciálně, což odpovídá teoretickým předpokladům, uvedených v teoretické části práce.

Byly diskutovány možné provozní režimy systému, při jednom tomto režimu byla měřena účinnost systému. Ta se pohybuje pod deseti procenty, konkrétně 9,28%. Změřená účinnost systému potvrzuje nastíněnou teorii o degradaci palivového článku

Na Ústavu elektrotechnologie bohužel nebyl k dispozici průtokoměr, který by byl schopný měřit závislost průtoku vodíku na výkonu článku. Další možností rozvoje systému je tedy doplnění kompatibilního průtokoměru a porovnání měřené závislosti průtoku vodíku na výkonu se závislostí dodanou výrobcem.

LITERATURA

- [1] BAGOTSKII, V. S. FUEL CELLS: PROBLEMS AND SOLUTIONS. HOBOKEN, N.J.: WILEY, C2009. ELECTROCHEMICAL SOCIETY SERIES. ISBN 978-0-470-23289-7.
- [2] NORANEKO. GROVE'S GASEOUS VOLTAIC BATTERY. WIKIMEDIA COMMONS [ONLINE]. 16.2.2008 [CIT. 2020-10-29]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grove%27s_Gaseous_Voltaic_Battery.png
- [3] PORŠ, Ing. Zdeněk. *Palivové články: Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky* [online]. 2002 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [4] Francis Thomas Bacon: British engineer. *Britannica* [online]. [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Francis-Thomas-Bacon>
- [5] Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility (NAP CM) 2019 [online]. [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/getattachment/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Vlada-schvalila-aktualizovany-Narodni-akcni-plan-c/Aktualizace-NAP-CM.pdf.aspx>
- [6] How an Alkaline Fuel Cell Works. *Alkammonia.eu* [online]. [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <http://alkammonia.eu/2013/how-an-alkaline-fuel-cell-works/>
- [7] JACOBSON, David. PEM Fuel Cells. Neutron Imaging Facility [online]. 2006, May 2006 [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/pemFuelCells.html>
- [8] Kam dospěl vývoj palivových článků? Technický týdeník [online]. 01.01.2006 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/kam-dospel-vyvoj-palivovych-clanku_16930.html
- [9] HORIZON FUEL CELL TECHNOLOGIES. *H-200 Fuel Cell Stack User Manual* [online]. 2011 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://manualzz.com/doc/6655440/h-200-fuel-cell-stack>
- [10] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Skladování vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [11] Hydrogen fuel: production, transport, and storage. Editor Ram B. GUPTA. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- [12] Mirai ebrochure. *Toyota* [online]. 2019, , 23 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: https://www.toyota.com/content/ebrochure/2019/mirai_ebrochure.pdf
- [13] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Vodíkové hospodářství* [online]. 2007 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vodikove-hospodarstvi/654-vodikove-hospodarstvi>

- [14] HELIOCENTRIS. *Metal Hydride Canister* [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z:
https://eifwiki.feit.uts.edu.au/_media/technical:renewables:metal_hydride_canister_en_1101.pdf
- [15] HERRES, David. Basics of measuring fuel cells. *Test and measurement tips* [online]. 9 October 2020 [cit. 2021-3-21]. Dostupné z:
<https://www.testandmeasurementtips.com/basics-of-measuring-fuel-cells-faq/>
- [16] EL 100c-250c User Manual. *Actaspa* [online]. [cit. 2021-4-23]. Dostupné z:
<https://www.actaspa.com/products/el100c-250c/>
- [17] *Agilent 34970 Data Acquisition System* [online]. 2010, 11 květen 2010 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z:
http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.download_page?p_id_guid=014F4CD7EF78136AE0440003BA7CCD71

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

NASA	Národní úřad pro letectví a vesmír (z anglického: National Aeronautics and Space Administration)
NAP CM	Národní akční plán čisté mobility
PEMFC	Palivový článek s polymerní membránou (z anglického: Proton-Exchange Membrane Fuel Cell)
AFC	Palivový článek s alkalickým elektrolytem (z anglického: Alkaline Fuel Cell)
DMFC	Palivový článek pro přímou reakci methanolu (z anglického: Direct Methanol Fuel Cell)
PAFC	Palivový článek s kyselinou fosforečnou (z anglického: Phosphoric Acid Fuel Cell)
MCFC	Palivový článek s uhličitánovou taveninou (z anglického: Molten Carbonate Fuel Cell)
SOFC	Palivový článek s pevným elektrolytem (z anglického: Solid Oxide Fuel Cell)

Symboly:

Δg_f	energie, potřebná pro pohyb náboje	(V.mol ⁻¹)
F	Avogadrova konstanta	(mol ⁻¹)
U_{teor}	teoretické napětí palivového článku	(V)
E_{in}	energie vstupující do systému	(Wh)
E_{out}	energie vystupující ze systému	(Wh)
η	účinnost systému	(%)
I	proud	(A)
U	napětí	(V)
P	výkon palivového článku	(W)
KOH	hydroxid draselný	
O	kyslík	
e^-	elektron	
H	vodík	
H_2O	voda	
Pt	platina	
CH_3OH	metanol	
H_3PO_4	kyselina fosforečná	
NiO	oxid nikelnatý	
CO_2	oxid uhličitý	

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ HODNOTY – PALIVOVÝ ČLÁNEK.....	50
PŘÍLOHA B - ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY.....	51

Příloha A - Naměřené hodnoty – palivový článek

I (A)	U (V)	P (W)
0,05	27,30	1,365
0,10	26,87	2,687
0,15	26,56	3,984
0,20	26,36	5,272
0,40	25,73	10,292
0,60	25,31	15,186
0,80	24,96	19,968
1,00	24,65	24,650
1,20	24,36	29,232
1,40	24,13	33,782
1,60	23,90	38,240
1,80	23,67	42,606
2,00	23,45	46,900
2,20	23,24	51,128
2,40	23,02	55,248
2,60	22,81	59,306
2,80	22,61	63,308
3,00	22,40	67,200
3,20	22,19	71,008
3,40	21,94	74,596
3,60	21,73	78,228
3,80	21,51	81,738
4,00	21,28	85,120
4,20	21,02	88,284
4,40	20,74	91,256
4,60	20,44	94,024
4,80	20,10	96,480
5,00	19,69	98,450
5,20	19,40	100,880
5,40	18,99	102,546
5,60	18,53	103,768
5,80	18,25	105,850
6,00	17,62	105,720
6,20	17,24	106,888
6,40	16,59	106,176
6,60	16,17	106,722
6,70	15,74	105,458
6,80	15,36	104,448
6,90	14,95	103,155

Příloha B - Elektronické přílohy

Seznam příloh na přiloženém CD:

LabVIEW_projekt_H2_system (zdrojový kód měřícího programu)

H2_system_v1.5 (měřící program)

teplota_tlak_HS76.xlsx (Naměřené hodnoty teploty a tlaku při vybíjení úložiště)