

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

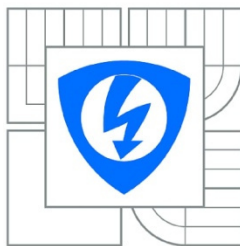
SIMULACE A VÝPOČTY ENERGETICKÉ BILANCE
KYSLÍKOVODÍKOVÉHO PALIVOVÉHO ČLÁNKU POMOCÍ PROGRAMU
LABVIEW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DANIEL FRYDA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Daniel Fryda
Ročník: 3

ID: 73042
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Simulace a výpočty energetické bilance kyslíkovodíkového palivového článku pomocí programu LabView

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod do palivových článků.
2. Seznámení a stručný popis programu LabView.
3. Možnosti využití palivových článků v praxi a v laboratorní výuce.
4. Návrh na sestavení laboratorní úlohy pro proměření energetické bilance kyslíkovodíkového palivového článku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jan Šlezinger

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

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.

Bibliografická citace práce:

FRYDA, D. *Simulace a výpočty energetické bilance kyslíkovodíkového palivového článku pomocí programu LabView*. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2011, 62 stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Šlezinger.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Simulace a výpočty energetické bilance kyslíkovodíkového palivového článku pomocí programu LabView

Daniel Fryda

vedoucí: Ing. Jan Šlezingr

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

**Simulation and calculation
of the energy balance of a hydrogen-
oxygen fuel cell with using program
LabVIEW**

by

Daniel Fryda

Supervisor: Ing. Jan Šlezingr

Brno University of Technology, 2011

Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá výpočtem charakteristik kyslíkovodíkového palivového článku a jejich simulací v programu LabVIEW. Je rozdělena do několika částí.

Na úvod práce objasňuje problematiku palivového článku a přispívá tak k lepšímu pochopení jeho činnosti. Pojednává o tom, co to vlastně palivový článek je, jaký je princip jeho činnosti, popisuje jeho součásti, nahlíží do historie a nastiňuje jeho vývoj po současnost. Dále práce rozděluje palivové články na jednotlivé typy a hlouběji se zabývá palivovým článkem kyslíkovodíkovým. Čtvrtá kapitola se věnuje jeho využití v praxi a v laboratorní výuce. Další část je zaměřena na program LabVIEW, kde je popsán jeho princip, využití a základní části programu.

V praktické části je realizován model laboratorní úlohy v programu LabVIEW. V kapitole 6 je rozpracován návod k obsluze programu a detailně popsána tvorba celého modelu.

Cílem této bakalářské práce je vytvoření přehledu o palivových člancích, jejich vlastnostech a možnostech použití pro praxi a laboratorní výuku, a pak simulace laboratorní úlohy v programu LabVIEW, na základě naměřených dat a charakteristik kyslíkovodíkového palivového článku. Tato laboratorní úloha může být využívána jako výukový materiál pro studenty na Ústavu elektroenergetiky.

KLÍČOVÁ SLOVA:

palivový článek; kyslíkovodíkový palivový článek; kyslík; vodík; LabVIEW; čelní panel; blokový diagram

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the calculation of the characteristics of hydrogen-oxygen fuel cell and their simulation in LabVIEW. It is divided into several parts.

At the beginning thesis clarifies the issues of fuel cell and contributes to a better understanding of its activities. It explains what a fuel cell actually is, what is the principle of its work, describes its components, access to its history and its development to the present. Further on the thesis divides fuel cells into the different types and deals with deeper hydrogen-oxygen fuel cell. The fourth chapter is devoted to its use in practice and in laboratory education . Another part is focused on the LabVIEW program where is described the principle, use and basic parts of the program.

In the practical part is implemented the model of the laboratory task in LabVIEW program. In chapter no. 6 are developed the operating instructions of the program and described in detail the creation of the model.

The aim of this bachelor thesis is creation of an overview of fuel cells, their properties and possibilities of using for practice and laboratory education and then simulation of the laboratory task in LabVIEW program, which is based on measured data and the characteristics of the hydrogen-oxygen fuel cell. This laboratory task can be used as teaching material for students in the Department of Electrical Power Engineering.

KEY WORDS:

Fuel cell; hydrogen-oxygen fuel cell; oxygen; hydrogen; LabVIEW; front panel; block diagram

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
1 ÚVOD	12
2 PALIVOVÝ ČLÁNEK	13
2.1 PRINCIP ČINNOSTI PALIVOVÉHO ČLÁNKU	13
2.2 STRUKTURA PALIVOVÉHO ČLÁNKU	14
2.2.1 ELEKTRODY	14
2.2.2 ELEKTROLYTY	16
2.2.3 PALIVA A OKYSLIČOVADLA	16
2.3 HISTORICKÝ VÝVOJ PALIVOVÉHO ČLÁNKU	17
2.4 TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	17
2.4.1 PODLE POUŽITÉHO PALIVA	17
2.4.2 PODLE POUŽITÉHO ELEKTROLYTU	19
2.4.3 PODLE PROVOZNÍ TEPLOVY	20
3 KYSLÍKOVODÍKOVÝ PALIVOVÝ ČLÁNEK.....	21
3.1 KYSLÍK A VODÍK.....	21
3.1.1 KYSLÍK.....	21
3.1.2 VODÍK	23
3.2 PRINCIP ČINNOSTI KYSLÍKOVODÍKOVÉHO PALIVOVÉHO ČLÁNKU.....	28
3.3 TERMODYNAMIKA PALIVOVÉHO ČLÁNKU	29
4 VYUŽITÍ KYSLÍKOVODÍKOVÝCH PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	32
4.1 VYUŽITÍ V PRAXI.....	32
4.2 VYUŽITÍ V LABORATORNÍ VÝUCE	34
4.2.1 LABORATORNÍ VZOREK V LABORATOŘI UEEN.....	35
4.3 PROBLÉMY SKLADOVÁNÍ.....	37
4.4 BEZPEČNOST	37
5 PROGRAM LABVIEW	39
5.1 ÚVODNÍ OBRAZOVKA LABVIEW.....	40
5.1.1 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ.....	40
5.2 ČELNÍ PANEL (FRONT PANEL)	41
5.2.1 OBRAZOVKA ČELNÍHO PANELU	41
5.2.2 NÁSTROJOVÁ LIŠTA ČELNÍHO PANELU	42
5.2.3 PRVKY ČELNÍHO PANELU	42
5.3 BLOKOVÝ DIAGRAM (BLOCK DIAGRAM)	43
5.3.1 OBRAZOVKA BLOKOVÉHO DIAGRAMU	43
5.3.2 NÁSTROJOVÁ LIŠTA BLOKOVÉHO DIAGRAMU	43
5.3.3 PRVKY BLOKOVÉHO DIAGRAMU	44

6 PRAKTICKÁ REALIZACE MODELU V PROGRAMU LABVIEW	45
6.1 NÁVOD K OBSLUZE PROGRAMU	45
6.2 TVORBA PROGRAMU PRO SIMULACI LABORATORNÍ ÚLOHY	47
6.2.1 SMYČKY PRO VÝPOČET NAPĚTÍ NAPRÁZDNO FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU	49
6.2.2 SMYČKY PRO VÝPOČET PRAC. BODU FOTOVOLTAICKÉHO ČL. A ELEKTROLYZÉRU	50
6.2.3 SMYČKY PRO VÝPOČET PARAMETRŮ ELEKTROLYZÉRU	52
6.2.4 VSTUPNÍ DATA PALIVOVÉHO ČLÁNKU	53
6.2.5 SMYČKA PRO VYKRESLENÍ CHARAKTERISTIK PALIVOVÉHO ČLÁNKU	55
6.2.6 VÝPOČET PARAMETRŮ PALIVOVÉHO ČLÁNKU	55
7 ZÁVĚR.....	58
POUŽITÁ LITERATURA	60
PŘÍLOHY	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Vodíkový palivový článek.....	13
Obr. 2-2 Zjednodušený model palivového článku – princip činnosti.....	14
Obr. 2-3 Schematický řez porézní elektrodou.....	15
Obr. 3-1 Zjednodušený model výroby vodíku elektrolýzou vody.....	25
Obr. 3-2 Schéma SI procesu štěpení vody.....	27
Obr. 3-3 Voltampérová charakteristika palivového článku.....	31
Obr. 4-1 Nejmenší palivový článek na světě.....	33
Obr. 4-2 Elektrolyzátor 230.....	35
Obr. 4-3 Elektrolyzátor 65.....	36
Obr. 4-4 F110 Fuel Cell Stack 10.....	36
Obr. 4-5 Test úniku a vznícení vodíku (vlevo) vs. benzínu (vpravo).....	38
Obr. 5-1 Úvodní obrazovka LabVIEW.....	40
Obr. 5-2 Jednoduchý příklad čelního panelu.....	41
Obr. 5-3 Nástrojová lišta čelního panelu.....	42
Obr. 5-4 Paletové menu prvků čelního panelu.....	42
Obr. 5-5 Jednoduchý příklad blokového diagramu.....	43
Obr. 5-6 Nástrojová lišta blokového diagramu.....	44
Obr. 5-7 Paletové menu funkcí a struktur blokového diagramu.....	44
Obr. 6-1 Čelní panel vytvořeného modelu v LabVIEW.....	45
Obr. 6-2 Způsob interpolace dat.....	48
Obr. 6-3 Aproximace průběhů V-A charakteristiky fotovoltického článku polynomem 5. st.....	49
Obr. 6-4 Smyčky CASE a FOR pro výpočet napětí naprázdno fotovoltického článku.....	50
Obr. 6-5 Výpočet pracovního bodu fotov. článku a elektrolyzátoru.....	51
Obr. 6-6 Smyčka CASE pro výpočet pracovního bodu fotovoltického článku a elektrolyzátoru.....	51
Obr. 6-7 Smyčky CASE a FOR pro výpočet času plnění a dalších parametrů elektrolyzátoru.....	53
Obr. 6-8 Zatěžovací charakteristika experimentálního palivového článku.....	54
Obr. 6-9 Závislost dosahovaného výkonu na zatížení.....	54
Obr. 6-10 Smyčka CASE pro zobrazení grafických závislostí palivového článku.....	55
Obr. 6-11 Výpočet parametrů palivového článku.....	57

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Charakteristiky některých článků podle použitého paliva.....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 4-1 Přehled automobilů jezdících na vodíkový pohon.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 6-1 Naměřené hodnoty elektrolyzéru 65.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6-2 Naměřené hodnoty elektrolyzéru 230.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6-3 Hodnoty použité pro simulaci fotovoltaiického článku.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6-4 Hodnoty naměřeného napětí, proudu a vypočteného výkonu.....</i>	<i>54</i>

1 ÚVOD

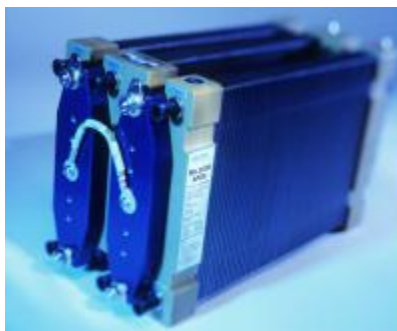
Palivové články jsou systémy, které konvertují chemickou energii elektroaktivních materiálů, jako jsou paliva a oxidovadla, přímo na elektrický proud. [2]

Elektrochemický palivový článek je generátor stejnosměrného proudu. Palivový článek je zvláštním typem galvanického článku. Podobně jako každý galvanický článek je složen ze dvou elektrod, které jsou od sebe odděleny elektrolytem. K oxidaci paliva dochází ve dvou prostorově oddělených elektrochemických dějích. Jeden probíhá u anody, druhý u katody. [3]

Protože se aktivní materiály přivádějí na elektrody, kde reagují, přičemž se elektrody neúčastní chemické reakce, mohou být články v provozu teoreticky neomezenou dobu. Jejich životnost je prakticky omezena životností elektrod. Funkce elektrod v elektrochemické reakci těchto systémů je pouze katalytická, což je hlavní rozdíl oproti primárním a sekundárním zdrojům. [2]

2 PALIVOVÝ ČLÁNEK

Palivový článek je elektrochemická soustava složená ze dvou elektrod, ke kterým je přiváděno palivo a okysličovadlo. Existuje mnoho kombinací paliva a okysličovadla. Nejčastější kombinací je vodík jako palivo a kyslík jako okysličovadlo, dále lze jako palivo použít uhlovodíky a alkoholy a jako okysličovadlo pak vzduch, chlór nebo oxid chloričitý a další. Elektrody jsou umístěny v elektrolytu a dílčí chemické reakce, které na nich probíhají, jsou závislé na jeho pH. Elektrolyt může mít různý charakter: alkalický například hydroxid draselný nebo kyselý v podobě kyseliny fosforečné (H_3PO_4), dále polymerní to jsou elektrolytické membrány, tavenina alkalických uhličitů nebo pevný oxidický elektrolyt. Nejčastěji se používá alkalický hydroxid draselný (KOH).



Obr. 2 – 1 Vodíkový palivový článek [11]

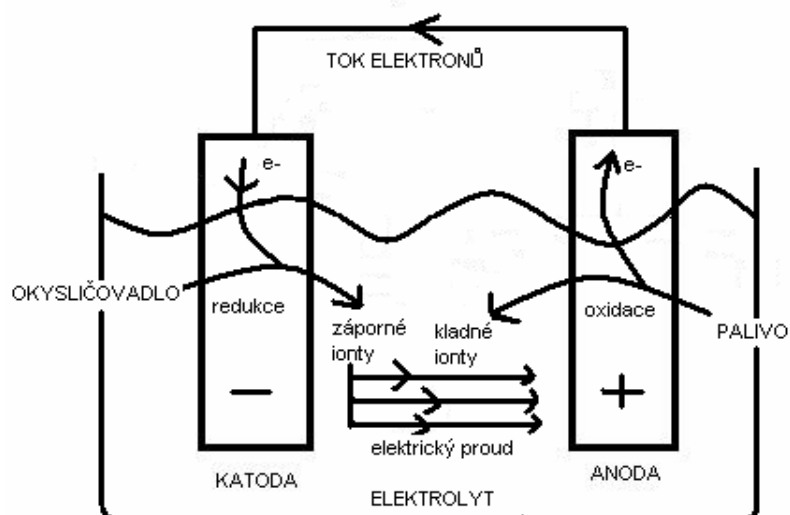
2.1 Princip činnosti palivového článku

Principem činnosti palivového článku je oxidace paliva, ke které dochází ve dvou prostorově oddělených elektrochemických dějích. Tyto děje probíhají u anody a u katody.

Elektrony vzniklé elektrochemickou reakcí u anody procházejí do katody přes vnější zatěžovací obvod. U katody se zúčastní elektrochemické reakce, při níž se tvoří záporné ionty. Elektrický proud uvnitř elektrolytu je tedy vyvolán tokem iontů, zatímco ve vnějším obvodu jsou nositelem proudu elektrony. [3]

Na rozdíl od obvyklých monočlánků (baterií), ve kterých se elektrody při odběru proudu spotřebovávají, zůstávají elektrody v palivovém článku stálé, avšak spotřebovává se palivo a okysličovadlo, kterými jsou elektrody omývány. Zatímco elektrody uvnitř baterie jsou opotřebovávány, v palivovém článku jsou elektrody katalyticky i relativně stabilní. [6]

Přívodem paliva a okysličovadla je zajištěn prakticky nepřetržitý vznik elektrického proudu, a to proudu stejnosměrného. Na obrázku zjednodušeného modelu palivového článku lze vidět jak tento proud vzniká a chemické reakce, které v něm probíhají.



Obr. 2 – 2 Zjednodušený model palivového článku – princip činnosti.

2.2 Struktura palivového článku

Struktura, kvalita a chemické složení použitých materiálů palivového článku, čili elektrod, elektrolytu, paliva a okysličovadla, ovlivňují velikost vznikajícího elektrického napětí mezi elektrodami.

2.2.1 Elektrody

Palivový článek se skládá ze dvou elektrod – katody a anody, které jsou navzájem odděleny membránou nebo elektrolytem.

Elektrody jsou důležitou součástí palivových článků především proto, že v nich dochází k elektrochemickým reakcím, shromažďují elektrony a nesou elektrický proud. Elektrody musí mít dobrou vodivost, dobré katalytické vlastnosti, přijatelné mechanické vlastnosti a chemickou stabilitu v korozivním elektrolytu.

Elektrody musí rovněž umožnit difúzi plynu. Za tímto účelem se vyrábí jako porézní. Porézní elektroda má houbovitou strukturu, která se skládá z drobných zrn vhodného kovu nebo uhlíku. Vyrábí se lisováním, spékáním případně lepením. Dobrá porézní elektroda obsahuje v 1 cm^2 povrchu 10^5 pórů, jejichž velikost je řádově v desítkách nanometrů.

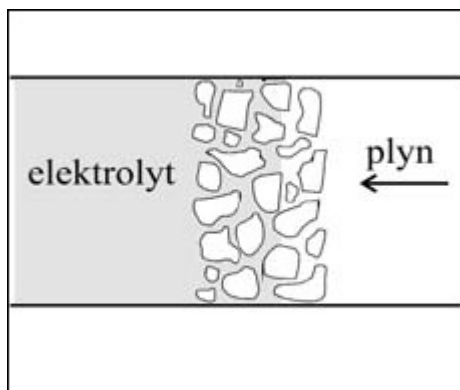
Jedna strana porézní elektrody se stýká s elektrolytem, druhá s plynným palivem nebo s okysličovadlem.

V elektrodě lze najít tři oblasti:

- oblast A - neaktivní (obsahuje elektrolyt),
- oblast B - aktivní, v níž se stýkají všechny tři fáze - plynná (palivo nebo okysličovadlo), kapalná (elektrolyt) a pevná (zrna elektrod)
- oblast C - neaktivní (póry zaplněny plynem)

K nejintenzivnějším reakcím dochází při styku paliva nebo okysličovadla, elektrolytu a zrn elektrody, tj. v oblasti B.

Aby elektrochemické reakce v elektrodách probíhaly s nejvyšší možnou účinností používají se k aktivnímu povrchu elektrod katalyzátory. Dobré katalytické povrchy dávají zejména platina, stříbro, zlato, iridium, kobalt, rhodium, nikl ap. [3]



Obr. 2 – 3 Schematický řez porézní elektrodou [2]

2.2.2 Elektrolyty

Elektrolyty jsou prostředí, které vyplňuje prostor mezi elektrodami. Mohou mít různou charakteristiku, co se týče skupenství nebo pH.

Jako elektrolyt mohou sloužit různé kyseliny (převážně H_3PO_4) nebo zásady (nejčastěji KOH), keramiky nebo membrány. U specifických palivových článků se používá jako elektrolyt plyn pod vysokým tlakem. Dnes nejpoužívanějším elektrolytem je KOH, který byl použit už u článků v projektu Apollo, jehož nevýhodou však je, že se oxidovadlo musí čistit od CO_2 , aby nedocházelo k reakci oxidu uhličitého s elektrolytem, neboť vzniklý uhličitán draselný by přestal plnit funkci elektrolytu. [6]

2.2.3 Paliva a okysličovadla

Dalšími nezbytnými součástmi palivových článků jsou palivo a okysličovadlo. Palivo je přiváděno k anodě a nejčastěji se používá vodík, hydrazin, uhlovodík, alkohol, amoniak, uhlí a zemní plyn. Palivo je na anodě oxidováno. [6]

Tab. 2 – 1 Charakteristiky některých článků podle použitého paliva [3]

Palivo	Reakce s kyslíkem	Napětí [V]		Elektrolyt
		U_o	U_r	
Vodík	$2H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$	1,23	1,15	KOH
hydrazin	$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$	1,56	1,28	KOH
metan	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	1,06	0,58	H_2SO_4
metylalkohol	$2CH_3OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O$	1,21	0,98	KOH
čpavek	$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 6H_2O + 2N_2$	1,17	0,62	KOH
zinek	$2Zn + O_2 \rightarrow 2ZnO$	1,65	1,45	NaOH

Ke katodě je přiváděno okysličovadlo neboli oxidační činidlo, které se zde redukuje a nejlépe těmito vlastnostem vyhovují látky jako je kyslík, peroxid vodíku nebo thiokyanát draselný. [6]

2.3 Historický vývoj palivového článku

Už v roce 1838 švýcarský vědec Christian Friedrich Schönbein objevil a také popsal princip palivového článku. Díky jeho práci pak mohl Sir Wiliam Grove vyrobit první fungující prototyp. V roce 1889 vědci Charles Langer a Ludwig Mond poprvé použili termín „palivový článěk“. Jejich pokusy vyvinout článěk napájený svítiplynem ztroskotaly na vysokých nákladech tohoto projektu. William Jacques použil jako první při výrobě článku kyselinu fosforečnou jako elektrolyt a některé zdroje tvrdí, že právě on drží prvenství v použití termínu „palivový článěk“.

Důležitý zlom v historii palivových článků byl rok 1932 a Francis Thomas Bacon. Ten jako první sestrojil palivový článěk, který se dal využít v praxi. Jako elektrolyt použil hydroxid draselný, který je hojně využíván dodnes. O dvacet let později měl zdroj, založený na tomto článku výkon 5 kW.

Dalším mezníkem ve vývoji byla 60. léta 20. století, a to především díky silně se rozvíjejícímu kosmickému výzkumu. Díky velice výhodnému poměru energie a hmotnosti používali vědci z NASA právě palivové články jako zdroje energie pro raketový pohon. Byly jimi například vybaveny kosmické lodi programu Apollo a jsou zdrojem energie i pro současné raketoplány. Další výhodou je ekologický provoz kyslíkovodíkového článku, protože jeho odpadní produktem je pouze voda, která se navíc může dále využívat ve vodním režimu raketoplánu.

2.4 Typy palivových článků

2.4.1 Podle použitého paliva

Podle použitého paliva se články zpravidla dělí na:

- | | |
|-----------------|---------------------------|
| 1. vodíkové | 5. amoniakové |
| 2. hydrazinové | 6. uhelné a na zemní plyn |
| 3. uhlovodíkové | 7. biochemické |
| 4. alkoholové | 8. redoxové |

- Vodíkové palivové články

Tyto články jsou velmi aktivní, jednoduché a praktické. Nejúčinnější z nich je Baconův článek (prac. teplota 200°C, tlak 0,35 MPa, elektrolyt 44% KOH).

- Hydrazinové palivové články

Používají kapalné palivo hydrazin (N_2H_4), které je rozpustné ve vodních elektrolytech. Nevýhodou je, že hydrazin je jedovatý a nákladný.

- Uhlovodíkové palivové články

Používají jako palivo nasycené (metan, propan aj.) i nenasycené (etylén ap.) uhlovodíky. Dobré účinnosti dosahují při provozních teplotách vyšších než 150°C.

- Alkoholové palivové články

Používají např. metanol (CH_3OH) jsou atraktivní pro levnost a snadnou možnost uskladnění paliva v kapalné fázi. Pracují při teplotách okolo 60°C. Mají však malou životnost. Okysličovadlem je kyslík nebo vodík.

- Amoniakové palivové články

Čpavek (NH_3) je levné a dobře reagující palivo. Skladovatelné rovněž i v kapalném stavu. Jejich vlastnosti jsou podobné článkům hydrazinovým. Pracují při nízkých teplotách.

- Palivové články používající uhlí a zemní plyn

Uhlí nelze použít přímo. Musí být předem zoxidováno na oxid uhelnatý (CO). Zemní plyn je směsí metanu, vodíku ad. Při nižších teplotách se používají alkalické elektrolyty.

- Biochemické palivové články

Biochemické palivové články používají jako palivo bioorganický materiál. Na katodu se vstříkuje oxidant a na anodu se dává bioorganický materiál jako palivo. Ke katalyzování oxidace se tedy používají mikroorganismy. Elektrolytem může být buď organický roztok nebo vodný roztok hydroxidu draselného. Jako palivo se používají určité typy hub nebo cukroza ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) apod. Elektrický výkon biochemického článku je závislý na bakteriálním metabolismu. Nejlepší články dosahují výkonové hustoty 0,2 mW/cm².

- Redoxové palivové články

Redoxový palivový článek je článek, který lze regenerovat. Palivem používaným v redoxových člancích jsou kovové hybridy (např. lithia a vápníku) a elektrolytem jsou silně koncentrované vodní roztoky. V tomto článku se látky, vzniklé chemickou reakcí, odvádějí mimo

článek, kde se regenerují a přivádějí znovu do článku jako palivo a okysličovadlo. Energie potřebná k regeneraci redoxového článku může být dodávána z různých zdrojů (slunce, radioizotopy). [3]

2.4.2 Podle použitého elektrolytu

Palivové články mohou mít elektrolyt:

1. alkalický elektrolyt (AFC – Alkaline Fuel Cell)
2. kyselina fosforečná (PACF – Phosphoric Acid Fuel Cell)
3. polymerní elektrolytická membrána (PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
4. tavenina alkalických uhličitů (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell)
5. pevný oxidický elektrolyt (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell)

- Alkalický elektrolyt

Palivové články tohoto typu patří k prvním používaným typům. Palivem je vodík (H_2). Jako okysličovadlo lze použít buď kyslík (O_2) nebo vzduch, jako elektrolyt bývá použit hydroxid draselný (KOH).

- Kyselina fosforečná

Tyto články, jejichž elektrolyt tvoří 100% kyselina fosforečná (H_3PO_4), jsou komerčně používány s pracovní teplotou $200^\circ C$. V Japonsku je používán zdroj o výkonu 11 MW.

- Polymerní elektrolytická membrána

Palivové články s polymerní elektrolytickou membránou pracují při nízkých teplotách. Tato skutečnost umožňuje jejich rychlejší nabití a zlepšuje dynamiku výkonu při provozu článku. Pro tyto články je typická vysoká proudová hustota, takže jsou vhodné např. pro pohon vozidel.

- Tavenina alkalických uhličitů

Tyto články jsou vyvíjeny pro použití zemního plynu jako paliva. K zajištění dostatečné vodivosti uhličitového elektrolytu je třeba zajistit pracovní teplotu cca $650^\circ C$. Nevýhodou je vysoce agresivní pracovní prostředí, které významně ovlivňuje životnost elektrod. Spaliny lze využít pro kogeneraci.

- Pevný oxidický elektrolyt

Pevný elektrolyt potřebuje k provozu poměrně vysokou teplotu nad 800°C. Výhodou je, že všechny komponenty článku jsou pevného skupenství, což umožní jejich libovolnou konstrukci. [3]

2.4.3 Podle provozní teploty

Podle pracovní teploty dělíme palivové články na:

1. nízkoteplotní : 60 - 130°C
2. středněteplotní: 160 - 220°C
3. vysokoteplotní: 600 - 1050°C [3]

3 KYSLÍKOVODÍKOVÝ PALIVOVÝ ČLÁNEK

V současné době jeden z nejlépe prostudovaných palivových článků lze uvést článek kyslíkovodíkový. Kyslíkovodíkový proto, že jako palivo je v tomto systému použit vodík a jako oksidovadlo kyslík. Nejčastějším používaným elektrolytem je zde alkalický elektrolyt v podobě hydroxidu draselného (KOH).

3.1 Kyslík a vodík

Tato kapitola se věnuje základním informacím o kyslíku a vodíku. Jsou to hlavní prvky pro správnou funkci kyslíkovodíkového palivového článku. Rozebírá jejich chemickou strukturu, fyzikální a chemické vlastnosti a jejich chování při výrobě a využití. Studium tohoto chování můžeme lépe pochopit princip činnosti a elektrochemické děje, které probíhají v kyslíkovodíkových článcích.

3.1.1 Kyslík

Chemická značka O (lat. Oxygenium) je plyný chemický prvek, tvořící druhou hlavní složku zemské atmosféry. Je biogenním prvkem a jeho přítomnost je nezbytná pro existenci většiny živých organismů na této planetě. Autorem jeho českého a slovenského názvu je Jan Svatopluk Presl. [6]

- **Fyzikální vlastnosti**

Je to plyn bez barvy, zápachu a chuti. Tuhý a kapalný kyslík mají modrou barvu, tvoří tři stabilní izotopy z nichž výrazně převládá ^{16}O , který tvoří více než 99,73 hmotnostních %. Ostatní, velmi vzácné izotopy jsou ^{17}O a ^{18}O . Ty se dají uměle připravit frakční destilací vody, elektrolýzou vody nebo termální difúzí plyného kyslíku. Kyslík tvoří tříatomový alotrop O_3 , nazývaný ozon. Existuje i atomární kyslík, vzniká elektrickým výbojem, dopravuje se podobně jako vodík v ocelových bombách, označených modrým pruhem, stlačený na 15 MPa, anebo v kapalném stavu ve speciálních nádobách. [12]

- **Chemické vlastnosti**

Je to extrémně reaktivní plyn, přímo oxidační mnoho prvků, buď při normální nebo při zvýšené teplotě. Přes vysokou disociační energii vazby v molekule O_2 jsou tyto reakce silně

exotermické a mohou probíhat spontánně (hoření) nebo až explozivně (např.: reakce s uhlíkem a vodíkem). Některé prvky se neslučují s kyslíkem přímo, např. některé těžko tavitelné nebo vzácné kovy, jako W, Pt, Au, a vzácné plyny, i když jsou známy oxosloučeniny všech prvků s výjimkou He, Ne, Ar a pravděpodobně Kr. Za vhodných podmínek přímo reaguje s mnoha anorganickými a také všemi organickými sloučeninami (reakce mohou být spontánní nebo mohou vyžadovat iniciaci teplem, světlem, elektrickým výbojem, chemisorpcí nebo různými katalyzátory). Atomární kyslík – O se připravuje působením elektrického výboje na O₂ za sníženého tlaku. Je reaktivnější než O₂. Oxidační čísla v izolovatelných sloučeninách mohou mít hodnoty +¹/₂, 0, -¹/₃, -¹/₂, -1 a -2. [12]

- **Využití kyslíku**

V medicíně se čistý kyslík používá při operacích a traumatických stavech pro podporu pacientova dýchání. Směsi kyslíku nebo vzduchu s inertními plyny slouží potápěčům k potlačení kesonové nemoci při ponorech do velkých hloubek. Také vysokohorští horolezci a letci se v nutných případech uchylují k dýchání čistého kyslíku. I piloti stíhacích letadel jsou vybaveni směsmi stlačených plynů, jejichž základní složkou je kyslík. To proto, že zvýšením koncentrace kyslíku se zvýší jeho parciální tlak a ulehčí se tak dýchání v řídké atmosféře a předejde vysokohorské nemoci. Američtí astronauti programu Apollo dýchali také atmosféru čistého kyslíku, což umožnilo snížit tlak v kabině zhruba na třetinu běžné hodnoty a tak odlehčit její hermetickou konstrukci. To se ale stalo osudným posádce Apolla 1, která ve vysoce hořlavé atmosféře uhořela. Při hoření směsi kyslíku s acetylenem lze dosáhnout rozmezí teplot zhruba od 3 150 - 3 200°C. Proto se kyslíko-acetylenový plamen využívá k řezání oceli a tavení kovů s vysokým bodem tání, např. platinových kovů. Při výrobě oceli je nutné především odstranit z matrice železa uhlík. Tzv. Bessemerův způsob výroby spočívá ve vhánění čistého kyslíku do roztaveného železa v konvertoru, kde za vysoké teploty taveniny dochází k oxidaci přítomného grafitického uhlíku na plynné oxidy, které z taveniny vytékají. Kapalný kyslík většinou slouží jako okysličovadlo raketových motorů při letech kosmických lodí. Kyslík se používá jako jedna ze složek pro náplň některých typů palivových článků. [6]

3.1.2 Vodík

Chemická značka H (lat. Hydrogenium) je nejlehčí a nejjednodušší plynný chemický prvek, tvořící převážnou část hmoty ve vesmíru. Má široké praktické využití jako zdroj energie, redukční činidlo v chemické syntéze nebo metalurgii a také jako náplň meteorologických a pouťových balonů a do 30. let 20. století i vzducholodí. [6]

- **Fyzikální vlastnosti**

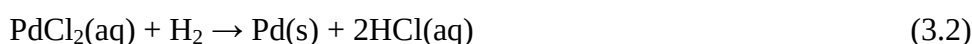
V přírodě se vyskytuje jako směs tří izotopů: lehký vodík - ^1H , deuterium (těžký vodík) - ^2H nebo ^2D , tritium - ^3H označovaný také jako ^3T . Je to bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu, je 14,4× lehčí než vzduch, obtížně se zkapalňuje a přeměňuje na pevnou látku. [12]

- **Chemické vlastnosti**

Vodík je málo rozpustný v kapalných rozpouštědlech, jako molekulový je málo reaktivní, protože má vysokou vazebnou energii. S fluorem reaguje za tmy za vzniku kyseliny fluorovodíkové:



Přímo redukuje roztok chloridu palladnatého za vzniku paladia a kyseliny chlorovodíkové:



Zapálen na vzduchu shoří. Reaguje se vzdušným kyslíkem na vodu. Tato reakce je exotermická:



Při laboratorní teplotě oba plyny spolu nereagují, při teplotě větší než 600°C probíhá slučování explozivně, čím prudčeji, čím je směs H_2 a O_2 blíže poměru 2:1, této směsi se říká třaskavý plyn. Za vyšší teploty reaguje s mnoha kovy a nekovy za vzniku hydridů (aktivace fotolyticky nebo katalyzátory Ni, Pd, Pt atd.

Mezi významné chemické vlastnosti patří redukční schopnosti, využívané při výrobě kovů:



Elektrickým výbojem vzniká atomární vodík (H), velmi reaktivní a nestálý. Existuje velmi krátkou dobu a slučuje se na vodík molekulový. Další vlastností vodíku je vytváření vazby vodíkovými můstky např. s O, F, N. [12]

- **Výroba vodíku**

Existuje několik způsobů jak vyrobit vodík. V dalším textu se zaměříme na nejrozšířenější, případně v současné době nejperspektivnější technologie jeho výroby.

- Parní reforming zemního plynu

Tato technologie je v současnosti nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku. Teplo pro reformní reakci i následnou konverzi oxidu uhelnatého je dodáváno z přímého spalování části zemního plynu (tzv. autotermní reforming). Proces má dvě fáze; v první se za přítomnosti katalyzátoru do vodní páry (500 - 1 100° C, 0,3 - 2,5 MPa) přivádí metan (dominantní část zemního plynu). Směs metanu a páry reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého a menšího podílu oxidu uhličitého. Poté následuje navyšování množství produkovaného vodíku konverzí CO z reforméru s další přidanou párou. Reakce probíhá již za nižších teplot.

Reformní reakci a konverzi CO lze zapsat takto:



Účinnost (konverze) produkce vodíku je závislá na poměru páry a uhlíku ve směsi; pohybuje se okolo 80 %. Značnou nevýhodou je produkce vysokého množství oxidu uhličitého; na 1 kg vodíku se vyprodukuje 7,05 kg CO₂.

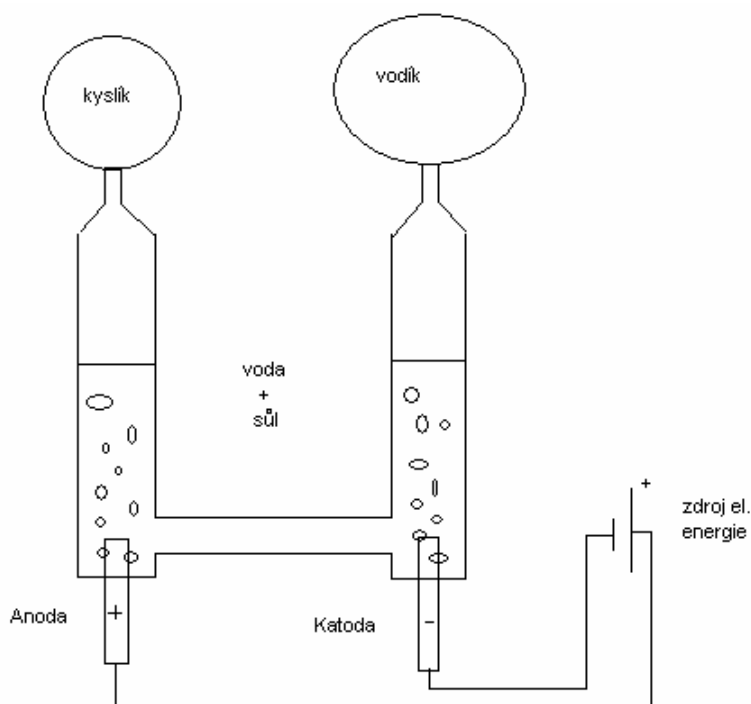
- Elektrolýza vody

Elektrolýza vody je proces, při kterém stejnosměrný proud při průchodu vodou (většinou s přidavkem dalších látek pro zvýšení vodivosti) rozštěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem:



H^+ (proton) poté reaguje na katodě za vzniku plynu, který je jímán a následně skladován. Proces elektrolýzy probíhá za pokojových teplot a pro jeho chod je nutná pouze elektrická energie. Tímto způsobem jsou vyrobeny asi 4 % z celkové světové produkce vodíku, který je využíván zejména tam, kde je třeba vysoce čistý vodík. Účinnost procesu se pohybuje v rozmezí 80 - 92 %. Výstupem elektrolýzy je kyslík a vysoce čistý vodíkový plyn, pro většinu aplikací bez nutnosti dodatečného dočišťování.

Na celkové účinnosti elektrolytické výroby vodíku se podílí především účinnost výroby elektrické energie (30 - 40 % pro konvenční zdroje). Celková účinnost elektrolýzy se tedy pohybuje přibližně v rozmezí 25 - 35 %. Výhodou je současná produkce kyslíku, který má podobně jako vodík široké využití.



Obr. 3 – 1 Zjednodušený model výroby vodíku elektrolýzou vody

- Vysokoteplotní elektrolýza

Pro vysokoteplotní elektrolýzu, nazývanou též někdy parní elektrolýza, je charakteristické, že část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla, čímž je zvýšena celková účinnost procesu oproti klasické elektrolýze vody. Reakce probíhající ve vysokoteplotním elektrolyzátoru je reverzní k reakci probíhající v palivových článcích s pevnými oxidy. Do elektrolyzátoru vstupuje vodní pára a vodík; vystupuje z něho obohacená směs obsahující 75 % H_2 vodíku a 25 % H_2O páry. Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce.

Celková účinnost vysokoteplotní elektrolýzy (vč. výroby potřebné energie) může dosahovat až 45 %. Tato metoda je vedle termochemických cyklů štěpení vody, popsaných v dalším odstavci, slibným kandidátem na výrobu vodíku ve velkém měřítku.

- Termochemické cykly štěpení vody

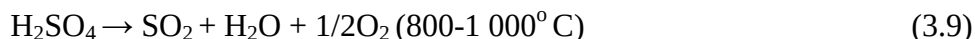
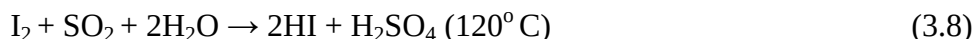
Termochemické cykly jsou známy již více jak 35 let; intenzivně byly studovány na přelomu 70. a 80. let 20. století (v době ropné krize, tedy v době hledání ekonomické výroby alternativních paliv). Při termochemickém štěpení vody je voda rozdělena na kyslík a vodík pomocí série chemických reakcí, které využívají energie ve formě vysokopotenciálního tepla anebo v případě hybridních cyklů tepla a elektřiny. Cykly popisované níže jsou cykly uzavřené, tj. použité chemické látky jsou v průběhu reakcí "recyklovány" a znovu vstupují do procesu. Doplňovanou vstupní surovinou je tedy pouze voda a výsledným produktem vodík a kyslík.

- S-I cyklus

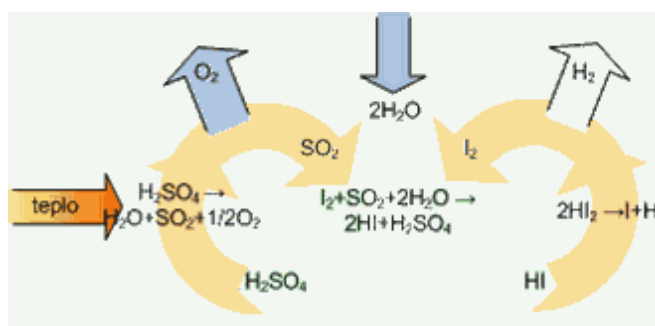
Siřičito-jódový termochemický cyklus byl vyvinut v General Atomics (San Diego, USA) v polovině 70. let 20. století. Je předním kandidátem levné a účinné výroby vodíku pomocí jaderné energie.

Vstupní surovinou je pouze voda a vysokopotenciální (s vysokou teplotou média) teplo; výstupními surovinami jsou kyslík s vodíkem a nízkopotenciální teplo. Všechny vstupní suroviny jsou tekuté. Jód a oxid siřičitý se recyklují a opětně používají, teoreticky se tedy neprodukuje žádný odpad (ve skutečnosti samozřejmě k určitým ztrátám dochází).

Při produkci vodíku probíhají tyto termochemické reakce:



V prvním kroku, který je znám jako Bunsenova reakce, reaguje vstupující voda s jódem a oxidem siřičitým za vzniku kyseliny sírové a jodovodíkové. Nejvíce tepla (a o nejvyšší teplotě, 800-1000 °C) vyžaduje endotermický rozklad kyseliny sírové. Rozklad kyseliny jodovodíkové a současná produkce vodíku vyžaduje teploty nižší (450° C). [13]



Obr. 3 – 2 Schéma SI procesu štěpení vody [13]

Účinnost celého výrobního cyklu vodíku se pohybuje v rozmezí 40-52 % (50 % při 950° C). S dalším nárůstem teplot bude růst i účinnost cyklu. Oproti elektrolýze má vyšší účinnost, protože není třeba vyrobené teplo přeměňovat se ztrátami na elektřinu.

Nevýhodou tohoto cyklu je požadavek vysokých vstupních teplot a agresivita kyseliny sírové a jodovodíkové, což vede k vysokým nárokům na chemickou odolnost použitých materiálů. Problematická bude kontrola podmínek reakcí v průmyslovém měřítku (v laboratorních podmínkách byla tato otázka již zvládnuta).

Mimo uvedené možnosti existuje celá řada dalších způsobů výroby vodíku. Pro masivní udržitelnou výrobu se jeví perspektivní výroba vodíku chemickými cykly nebo vysokoteplotní elektrolýza v kombinaci s vysokopotencionálním zdrojem tepla - vybrané reaktory tzv. Generace IV. Výroba vodíku se také může stát perspektivní metodou regulace spotřeby elektrické energie.[13]

- **Využití vodíku**

Vodík má mnoho využití. Je to především výroba amoniaku, methanolu, chlorovodíku, hydrogenace olejů, jako redukční činidlo při výrobě kovů, k řezání a sváření kyslíkovodíkovými a vodíkovými hořáky, dále jako palivo pro kyslíkovodíkové palivové články. Kapalný vodík se využívá při studiu elementárních částic (bublinová komora). V neposlední řadě také jako raketové palivo. [12]

3.2 Princip činnosti kyslíkovodíkového palivového článku

Nejjednodušším typem palivového článku je článek kyslíkovodíkový. Na katodě se kyslík jako oxidační činidlo redukuje na anionty O^{2-} , a ty pak reagují s H^+ ionty, které vznikly oxidací vodíku na anodě. Výsledným produktem této reakce je voda. Kyslíkovodíkový palivový článek tedy pracuje přesně obráceně než zařízení na elektrolýzu vody. Při elektrolýze z vody vyrábíme vodík a kyslík. Palivo a okysličovadlo, tedy vodík a kyslík, dodáváme do anody a do katody a přitom mezi nimi vznikne rozdíl elektrických potenciálů. Obě elektrody jsou pórovité a jsou odděleny elektrolytem, kterým je v tomto případě asi 40% vodný roztok hydroxidu draselného. Vodík přivedený na vnější povrch anody se důsledkem difúze dostává přes kanálky pórů houbovité elektrody do elektrolytu, kde se zúčastní elektrochemické reakce:



Při oxidaci vodíku jako paliva dochází k tvorbě elektronů, jak z reakce vyplývá. Tyto elektrony potom přecházejí vnějším elektrickým obvodem ke katodě, na kterou je přiváděn kyslík. Na povrchu této elektrody reaguje kyslík s částicemi vody podle následující reakce:



Hydroxidové aniony, vzniklé při této reakci, přecházejí uvnitř článku elektrolytem zpět na anodu a tím vzniká stejnosměrný elektrický proud. Obecně mohou být ionty procházející elektrolytem nabitý buď záporně nebo kladně podle používaného druhu palivového článku.

Dvě výše uvedené reakce parciální, můžeme také zapsat jako jednu reakci celkovou:



V palivovém článku tohoto typu se tedy vyrábí voda, která musí být z článku kontinuálně odstraňována. V některých aplikacích je voda vítaným produktem. [3]

3.3 Termodynamika palivového článku

Oxidace paliva v palivovém článku je chemická reakce, která probíhá za konstantní teploty a tlaku. Maximální teplo, které je k dispozici může být popsáno buď změnou entalpie (dH) nebo změnou entropie (dS). Je třeba určit veličinu, která bude vyjadřovat maximální energii, již lze přeměnit při elektrochemické reakci v energii elektrickou. Tuto veličinu nazýváme volnou Gibbsonovou energií (G), pro niž platí:

$$G = H - T \cdot S \quad (3.14)$$

Změna Gibbsonovy energie (ΔG) při konstantní teplotě (T) vyjadřuje rozdíl volné entalpie výchozích látek a produktů reakce:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (3.15)$$

kde součin $T \cdot \Delta S$ značí teplo vyměněné s okolím článku.

Využitelná energie se tedy rovná změně entalpie mínus tepelné ztráty systému při reakci. Entropii reakce lze při konstantním tlaku definovat jako:

$$S = \left[-\frac{\partial G}{\partial T} \right]_p \quad (3.16)$$

Dosazením takto definované entropie do předchozího vztahu dostaneme Gibbs-Helmholtzovu rovnici:

$$\Delta G = \Delta H + \left[\frac{\partial(\Delta G)}{\partial T} \right]_p \quad (3.17)$$

Zde je ΔG funkcí teploty a vyjadřuje maximální užitečnou práci W palivového článku, takže $W = \Delta G$. Užitečnou práci W lze vyjádřit $W = nI \cdot e \cdot E$, kde nI je počet nábojů, e je náboj elektronu a E je elektromechanický potenciál ve voltech.

Vyjádříme-li volnou energii ΔG jako funkci počtu elektronů n přenesených na 1 mol oxidovaného paliva bude:

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E \quad (3.18)$$

kde F je Faradayova konstanta, která určuje náboj vzniklý spálením 1 molu látky a její hodnota je $F = N_o \cdot e = 0,965 \cdot 10^5 \text{ C/mol}$ ($N_o = \text{Avogadrovo číslo} = 6,023 \cdot 10^{23}$), ($e = \text{elektrický náboj} = 1,6021 \cdot 10^{-19}$)

Dosazením rovnice (3.3.4) do rovnice (3.3.5) dostaneme přírůstek entalpie:

$$\Delta H = -n \cdot F \cdot \left(E - T \left[\frac{\partial E}{\partial T} \right]_p \right) \quad (3.19)$$

Potenciál lze snadno změřit jistou teplotní úrovní, takže můžeme získat jak ΔH , tak i ΔG . Účinnost palivového článku je definována výrazem:

$$\eta_i = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3.20)$$

Je to tzv. termodynamická neboli ideální účinnost. Veličina ΔG určuje energii, kterou lze přeměnit při elektrochemické reakci v energii elektrickou. Veličina ΔH vyjadřuje tzv. entalpii reakce a určuje spalné teplo, tj. celkovou energii uvolněnou při reakci okysličení paliva.

Zvyšování pracovní teploty palivového článku vede ke zmenšení účinnosti. Současně se však zvětší intenzita reakce, a tím se získá z článku větší elektrický výkon.

U reálného článku se z řady příčin (polarizace elektrod, ztráty aktivních látek, vedlejší reakce ap.) sníží teoreticky dosažitelná hodnota volné energie ΔG přeměněné na elektrickou energii na hodnotu $\Delta G'$, takže účinnost palivových článků s ohledem na změnu termodynamického potenciálu bývá prakticky:

$$\eta_G = \frac{\Delta G'}{\Delta G} = (0,3 \div 0,75) \quad (3.21)$$

Takže skutečná účinnost článku potom je:

$$\eta_r = \eta_i \cdot \eta_G = (0,3 \div 0,75) \cdot \eta_G \quad (3.22)$$

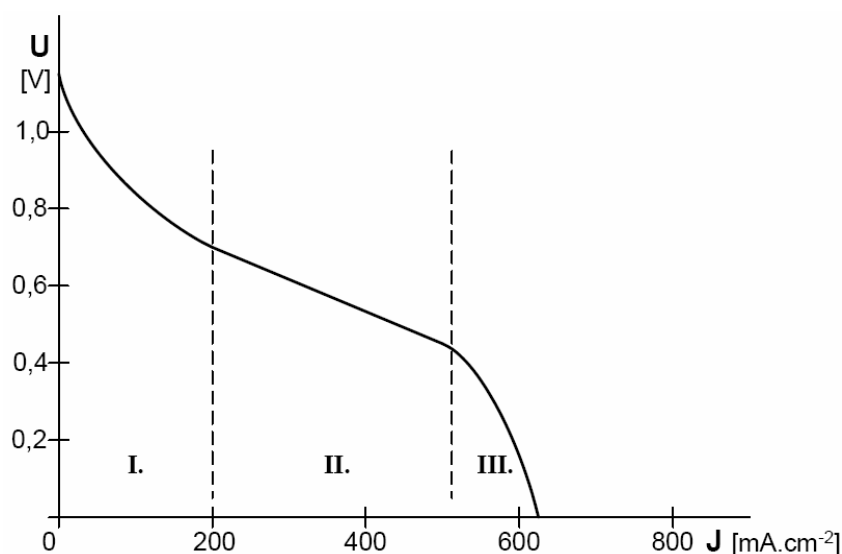
Ideální napětí článku U_o (bývá obvykle řádu 1V) se určí ze vztahu:

$$U_o = \frac{\Delta G}{n \cdot F} \quad (3.23)$$

Skutečné napětí článku U_r je nižší než ideální U_o . Snížení napětí o ΔU je způsobeno úbytky napětí vznikajícími v palivovém článku, takže platí:

$$U_r = U_o - \Delta U \quad (3.24)$$

Úbytky napětí jsou v palivovém článku způsobené polarizací. Výstupní napětí klesá se zatížením (viz voltampérovou charakteristiku) v důsledku ztrát polarizací způsobených ztrátami na anodě a v elektrolytu. Polarizace je vyvolána třemi hlavními mechanismy. Na voltampérové charakteristice lze rozeznat tři různé pracovní režimy, jimž dominuje určitý druh polarizace. [3]



Obr. 3 – 3 Voltampérová charakteristika palivového článku [3]

V oblasti I je to *aktivační polarizace*, jíž odpovídá úbytek napětí vyvolaný elektrochemickými procesy, ke kterým dochází na povrchu elektrod vlivem oxidace.

V oblasti II se projevuje *rezistivní* (ohmická, odporová) polarizace, která závisí lineárně na zatížení článku a souvisí s elektrickým odporem elektrod i elektrolytu (nejsou dokonalými vodiči, proto vzniká napěťový spád).

V oblasti III se projevuje *koncentrační polarizace*, jejíž velikost závisí na vlastnostech elektrolytu, pórovitosti elektrod, druhu paliva (snižování koncentrace iontů na katodě, příp. koncentrace iontů na anodě, v důsledku oxidace paliva na anodě). Koncentrační polarizace se zmenšuje se zvyšováním pracovní teploty a tlaku palivového článku. V praxi způsobuje omezení maximální proudové zatížitelnosti vodíko-kyslíkového článku asi na 0,6 až 0,8 A cm⁻². [3]

4 VYUŽITÍ KYSLÍKOVODÍKOVÝCH PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

4.1 Využití v praxi

Řada světových automobilek již řadu let palivové články pro automobily vyvíjí, několik desítek automobilů již v praxi jezdí a je jen otázkou času, kdy palivové články nahradí klasické pohonné hmoty. Díky mnohem menším nákladům na spalovací motory v porovnání s palivovými články se zdá, že varianta spalování vodíku bude preferovanějším řešením do doby výrazného snížení nákladů palivových článků nebo do doby zvýšení jejich účinnosti energetické přeměny.[14]

V současné době se palivové články nejvíce využívají v USA, které jsou významným propagátorem této moderní technologie. V ulicích amerických velkoměst jezdí mnoho prostředků hromadné dopravy s vodíkovými alternativami těchto zdrojů a i několik institucí se v rámci výzkumných prací připojilo k projektu stacionárních systému (například vojenská akademie ve West Pointu). Každá větší a významnější automobilka již vlastní prototypy vozidel s pohonem na palivový článek – například Toyota (hybridní motory FCHV) nebo Honda (PEM článek). I zde je však kromě ceny vlastního článku hlavní problém s uskladněním paliva – v tomto případě plynného vodíku.[15]

Palivové články s tuhými polymery (PEM) se vyznačují dobrým výkonem a vysokou dynamikou regulace, proto je výhodné je použít jako mobilní jednotky nebo pro necentrální zásobování energií. Prototypy pro automobily, autobusy a dodávky jsou již v provozu a mohou být v dohledné době v masovém měřítku vyráběny. Ale také laptopy, používající jako zdroj energie palivový článek, se již vyvíjejí. Hlavním výrobcem PEM článků je patrně společnost Ballard Power Systém v Kanadě. DMFC představují určitou alternativu k palivovým článkům typu PEM, především v oblastech mobilního použití vykazují větší výhody než-li PEM palivové články. Existující čerpací stanice by se nemusely nákladně přestavovat ke skladování metanolu, jak by tomu mohlo být v případě vodíku. Mobilní telefony s technologií DMFC už vyrábí firma Motorola.

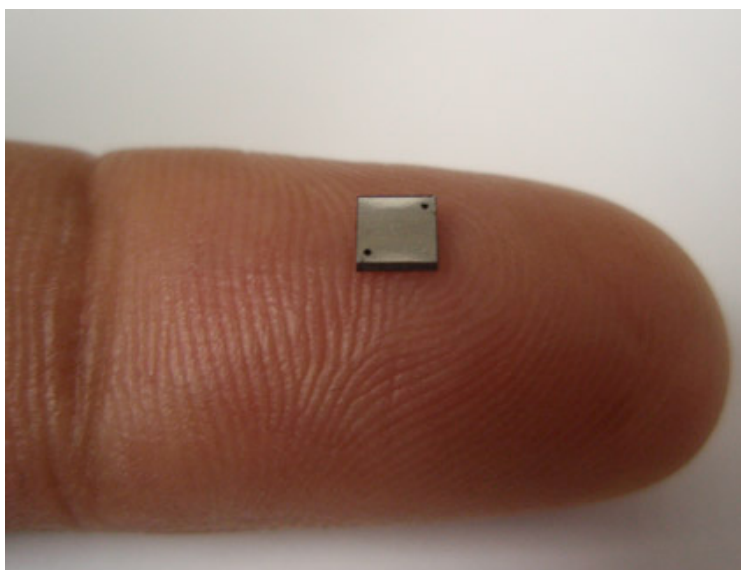
Stupeň účinnosti palivového článku s kyselinou fosforečnou (PAFC) není vysoká. Z technického a komerčního pohledu jsou nejvýhodnější pro výrobu tepla a elektrické energie

ve stacionárním provedení. Malé elektrárny o výkonech okolo 200 kW vyrábějí např. firmy Fuji-Electric, UTC, Toshiba-UTC.

Palivové články s roztavenými uhličitany (MCFC) jsou na základě své vysoké provozní teploty obzvláště vhodné pro teplárny nebo velké elektrárny, které by využívaly zemní plyn nebo plyn karbonský.

Palivové články s tuhými oxidy (SOFC) jsou nejméně vyvíjeným typem. Hlavní oblastí použití je výroba elektrické energie v elektrárnách nebo v oblasti kombinované výroby elektrické energie a tepla. Také v oblasti automobilismu se nachází jeho využití, ovšem ne v oblasti pohonu, nýbrž jako baterie osobních či nákladních vozidel. Jako palivo by zde sloužil benzin, který by byl veden do palivového článku přes jednoduchý reforming. [2]

Nejmenší palivový článek byl vyroben firmou US chemical engineers. Měří jen 3 mm na úhlopříčku. Je schopen vygenerovat napětí 0,7 V a proud 1 mA. Není to sice dostatečné pro napájení mobilních telefonů, které používají baterie na nižší napětí, ale lze ho využít pro provoz jednoduchých elektronických systémů nebo mikrorobotů. [20]



Obr. 4 – 1 Nejmenší palivový článek na světě [20]

V dnešní době mnoho automobilek vyvíjí automobily šetrnější k životnímu prostředí. Nahrazování spalovacích motorů alternativními zdroji, je jedním ze základních směrů, kam se automobilový průmysl ubírá. Kyslíkovodíkový palivový článek v kombinaci s elektromotorem, kterému dodává energii, je jedním z možných řešení náhrady spalovacího motoru. Tato kombinace je velmi výhodná. Samostatný elektromotor s akumulátorem má kratší dojezd na jedno nabití. Také samotné nabití trvá mnohem déle, než pouhé natankování vodíku. Velkou nevýhodou jak samostatných tak kombinovaných elektromotorů s palivovým článkem je vysoká

pořizovací cena. Dále nedostatek čerpacích stanic. Následující tabulka shrnuje základní technické parametry hybridních motorů různých automobilových značek.

Tab. 4 – 1 Přehled automobilů jezdících na vodíkový pohon [19]

Značka	Rok výroby	Kilogram vodíku	Dojezd v km	Max. výkon v kW	Max. točivý moment v N/m	Max. rychlost v km/h
Chevy FCEV	2007	4,2	338	94	48,8	161
Honda FCX Clarity	2009	3,9	386	100	256	161
Hyundai Tucson ix	-	5,6	653	100	-	161
Kia	2009	7,9	686,6	110	300	161
Mercedes B-class F-cell	2011	4	402	101	290	171
Nissan FCV X-trail	2005	-	499	90	280	150
FCMV Toyota Highlander	2008	6	694	90	260	155

4.2 Využití v laboratorní výuce

V roce 2005 byla otevřena laboratoř vodíkového palivového článku v areálu Fakulty Elektrotechnické Českého vysokého učení technického v Praze. Pilotní projekt energetického využití palivových článků realizovaný společností ENVIROS byl podpořen v rámci Národního programu na podporu energetických úspor a využití obnovitelných zdrojů energie v roce 2004. Vodíkové palivové články jsou velmi perspektivní technologií výroby elektřiny a tepla s nulovou produkcí emisí znečišťujících látek. Cílem pilotního projektu je představení moderní alternativní technologie kombinované výroby elektřiny a tepla v České republice, demonstrace zařízení v provozu včetně měření typových průběhů zatěžování, ověření možností využití jako

kogeneračního zdroje energie. Druhotným záměrem pilotního projektu je zapojení vědeckého pracoviště do přípravy a zejména do provozování technologie palivového článku s cílem přiblížení této nové technologie studentům elektotechnické fakulty – budoucím energetickým manažerům. [14]

V České republice se alternativním elektrochemickým zdrojem jako je palivový článek zabývají v určité míře všechny technické vysoké školy. ČVUT zakoupila velmi drahý komerční systém Relion z USA o výkonu 2 kW a provádí na něm základní aplikační výzkum. Relativně nejdále v tomto směru výzkumu je VŠB Ostrava se svým projektem Hydrogenix. Ovšem i zde se jedná převážně o aplikační výzkum na bázi komerčního článku od firmy Ballard USA. ZČU FEL v Plzni problematiku palivových článků řeší také na bázi aplikačního výzkumu, ovšem s nepoměrně menšími finančními prostředky. Základní laboratorní aplikační výzkum probíhá na systému STAXX od firmy H-Tech. Kromě proměřování klasických V-A charakteristik článku se bude další práce orientovat na jeho využití při výuce a při řešení bakalářských a diplomových prací. [15]

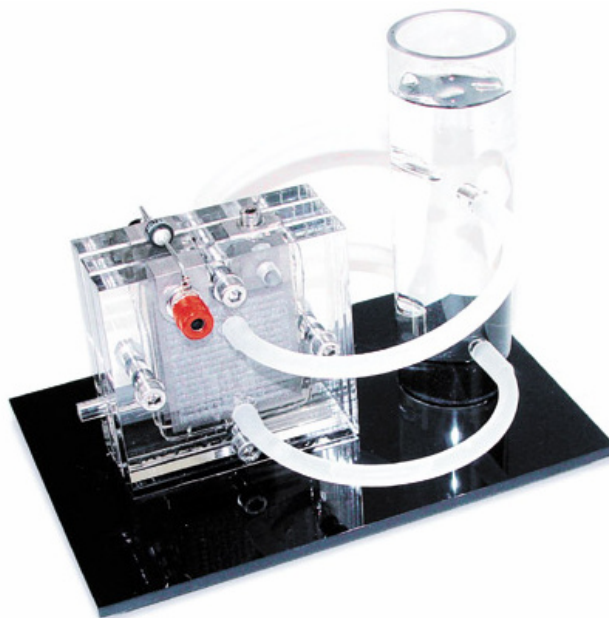
4.2.1 Laboratorní vzorek v laboratoři UEEN

Palivový článek se využívá i v laboratořích VUT v Brně. Ústav elektroenergetiky disponuje dvěma prototypy elektrolyzérů a palivovým článkem od firmy h-tec.



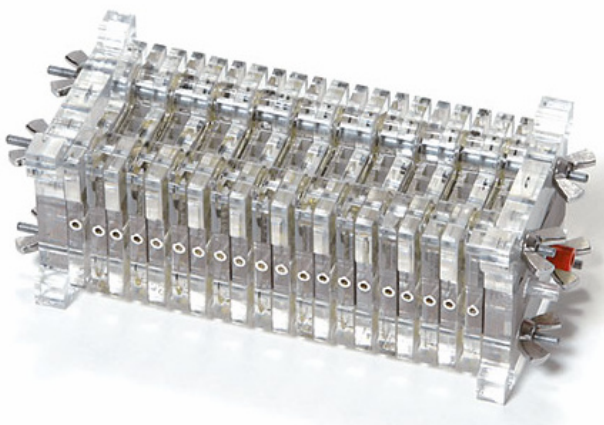
Obr. 4 – 2 Elektrolyzér 230 [21]

Elektrolyzér 230 má následující parametry: produkce vodíku $230 \text{ cm}^3/\text{min}$, výkon 50 W , rozměry $190 \times 264 \times 200 \text{ mm}$, váha $1,5 \text{ kg}$, proudové omezení 4 A DC , pracovní rozsah napětí $10,5 - 14 \text{ V DC}$. [21]



Obr. 4 – 3 Elektrolyzér 65 [21]

Elektrolyzér 65 vyrobí $65 \text{ cm}^3/\text{min}$, jeho výkon je 15 W , rozměry $140 \times 180 \times 120 \text{ mm}$, váha 460 g , proudové omezení 4 A DC a pracovní rozsah napětí činí $3 - 4 \text{ V DC}$. [21]



Obr. 4 – 4 F110 Fuel Cell Stack 10

Technické parametry F110: výkon jednotlivých polí je 200 mW , výkon všech 10 polí celkem činí 2 W , rozměry $60 \times 178 \times 70 \text{ mm}$ a váha 430 g . [21]

Vzájemným propojením těchto komponent (zdroj napětí jako je např. solární panel nebo zdroj na větrný pohon, elektrolyzátor a palivový článek), lze sestavit laboratorní úlohu na proměření energetické bilance kyslíkovodíkového palivového článku. Změnou nastavení parametrů jednotlivých částí úlohy, pak můžeme sledovat změny závislostí charakteristik kyslíkovodíkového palivového článku. Toho bylo využito pro získání potřebných dat k vytvoření virtuální laboratorní úlohy nasimulované v programu LabVIEW.

4.3 Problémy skladování

Možnost dlouhodobého skladování vodíku představuje základní technologickou výhodu oproti dalšímu nosiči energie – elektřině, u které je nutno neustále regulovat rovnováhu mezi výrobou a spotřebou. "Uskladnění" elektřiny v akumulátorech není využitelné v měřítku velkovýroby, přečerpávací elektrárny jsou sice užitečnou, ale opět poněkud okrajovou možností. Skladování vodíku tedy představuje velmi výhodnou možnost, jak optimalizovat a regulovat výrobu a spotřebu energií obecně. Existují například plány na propojené výroby elektřiny a vodíku přes elektrolyzu, což by umožnilo snazší regulaci jaderných elektráren, které by mohly pracovat při optimálním zatížení po celou dobu a v období sníženého odběru by se vyráběl vodík, využitelný buď pro výrobu elektřiny (v době špičky) nebo pro dopravu. Popsané propojení by bylo užitečné i u jiných typů elektráren. Nicméně některé fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku nám jeho uskladňování trochu komplikují, jako např. jeho velmi nízká hustota a bod varu.

4.4 Bezpečnost

Všechna paliva jsou nějakým způsobem nebezpečná. Vysoká hustota energie, hořlavost a výbušnost jsou vlastnosti, které jsou společné všem druhům paliv. Skladování těchto látek v prostoru vozidla představuje riziko vznícení, případně výbuchu paliva vně spalovací komory tepelného motoru nebo palivového článku. Vodík není v tomto ohledu výjimkou, přesto je jeho chování v mnoha ohledech velmi odlišné od stávajících fosilních paliv. [13]

Vodík tvoří spolu se vzduchem hořlavou a výbušnou směs v širokém rozsahu koncentrací (4-75 % objemu pro hořlavou směs a 19-59 % objemu pro výbušnou směs). Při rychlé expanzi může dojít k samovznícení. Vodík má velmi nízkou zápalnou energii, již velmi malý elektrostatický náboj (0,02 J) může iniciovat vzplanutí paliva, nízká viskozita a malá velikost vodíkové molekuly kladou zvýšené nároky na utěsnění palivové soustavy. Únik vodíku není možné rozpoznat lidskými smysly. Velmi nízká hustota plynu napomáhá rychlému rozptylu do

okolí, a tedy rychlému snížení koncentrace pod zápalnou mez. Nebyly zjištěny toxické účinky na člověka, při hoření nevznikají toxické zplodiny. Za denního světla není vodíkový plamen téměř viditelný.

Přestože většina výše uvedených parametrů je z hlediska bezpečnosti oproti běžným palivům méně příznivých, mnoho praktických zkoušek prokázalo menší destrukční účinky vzplanutí vodíkové nádrže na vozidlo i menší riziko pro posádku. Na následujícím obrázku je test úniku a následného vznícení vodíku vs. stejná situace s vozidlem na benzin. [13]



Obr. 4 – 5 Test úniku a vznícení vodíku (vlevo) vs. benzínu (vpravo)[13]

Při destrukci nádrže stoupá vodík díky své nízké hustotě velmi rychle vzhůru a případný požár vzniká ve větší míře vně vozidla. K zvýšení bezpečnosti přispívá i menší množství paliva skladovaného ve vozidlech. Bezpečnost se dá dále zvýšit vhodným umístěním skladovací nádrže (u autobusu například na střechu vozidla). [13]

5 PROGRAM LabVIEW

Programovací a vývojové prostředí LabVIEW (z angl. Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) čili „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“, někdy též LV, je produktem americké firmy National Instruments, která je průkopníkem a největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace, technické disciplíny, která zažívá veliký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu. Prostor LabVIEW, někdy nazývané též jako G-jazyk (tedy „grafický“ jazyk), je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů různé složitosti, ale také k programování složitých systémů, jako je třeba robot. S určitou nadsázkou lze říci, že prostředí LabVIEW nemá omezení své použitelnosti. [8]

LabVIEW je grafické programovací prostředí, které používají milióny inženýrů a vědců k vývoji sofistikovaných měření, testování a řídicích systémů využívající intuitivní ikony a dráty, které se podobají vývojovému diagramu. LabVIEW nabízí bezkonkurenční integraci s tisíci hardwarovými zařízeními a poskytuje stovky zabudovaných knihoven pro pokročilé analýzy a vizualizaci dat. LabVIEW je škálovatelná platforma pro více cílů a operačních systémů, která se stala předně používanou již od svého zavedení v roce 1986. [7]

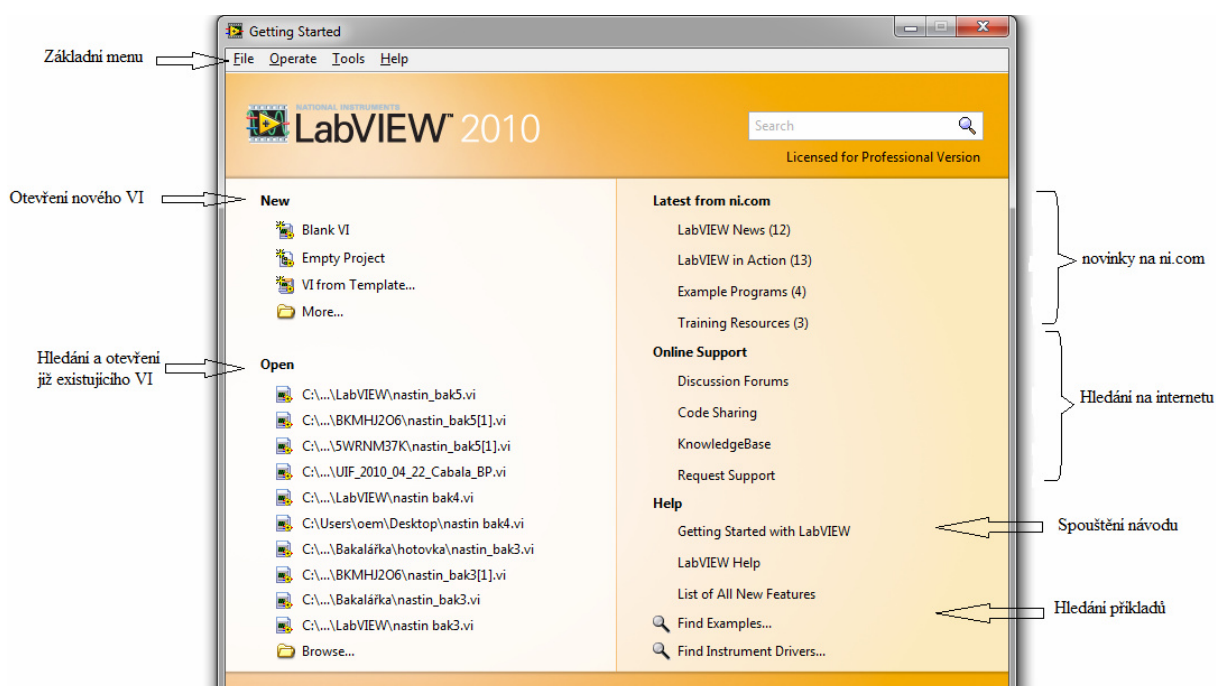
Hlavním cílem virtuální instrumentace je nahradit dočasně nebo i trvale prostorově, finančně a mnohdy i časově náročné využití technických prostředků (hardware) řešením virtuálním (zdánlivým) za přispění programových prostředků (software) a zejména pak grafickými a vizuálními prostředky a zprostředkovat tak uživateli maximální názornost. Toto řešení umožňuje rychlé navrhování nových aplikací i provádění změn v konfiguraci, což je u realizace skutečnými nástroji za pomoci reálných součástek často velice nákladné nebo přímo nemožné. Již více než 20 let vytváří grafický programovací jazyk LabVIEW společnosti National Instruments revoluci ve vývoji testovacích, měřicích a řídicích aplikací. I bez předchozích zkušeností mohou technici a vědci rychle a z hlediska nákladů efektivně používat měřicí a řídicí hardware, analyzovat data, sdílet výsledky a distribuovat systémy. [8]

Za největší výhody LabVIEW jsou považovány: intuitivní grafický způsob programování zvláště vhodný pro uživatele bez předchozí zkušenosti programování, stovky integrovaných funkcí pro měření a analýzu a dále možnost běhu aplikací na různých platformách a v embedded systémech. LabVIEW má významný vliv na tradiční akademický výzkum a výuku. Laboratoř založená na vývojovém prostředí LabVIEW umožňuje produktivnější a lepší způsob výuky.

Vyučující a studenti se spíše než na metody shromažďování dat mohou více soustředit na výsledky a koncepty. [7]

5.1 Úvodní obrazovka LabVIEW

Po spuštění programu LabVIEW se zobrazí úvodní obrazovka **Getting Started** s navigačními dialogovými okny pro práci se soubory a pro hledání dalších informací a zdrojů pro práci (viz obr. 5 – 1). Obrazovka zmizí, jakmile se přejde na další funkci nebo se otevře další okno. Do úvodní obrazovky se lze vrátit po zavření všech upravovaných programů.



Obr. 5 – 1 Úvodní obrazovka LabVIEW

5.1.1 Uživatelské rozhraní

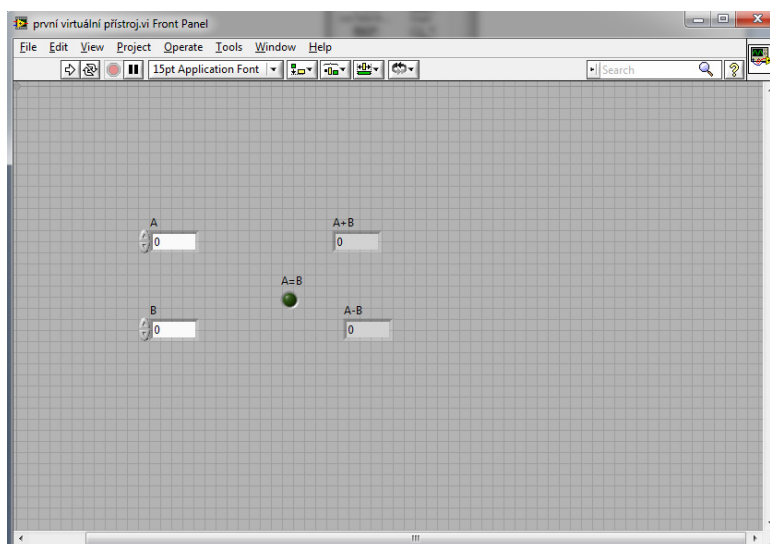
Uživatelské rozhraní programu LabVIEW mívá obvykle podobu čelního ovládacího panelu určitého měřicího přístroje. To je také jeden z důvodů, proč se program v LabVIEW nazývá pojmem zdánlivý (virtuální) přístroj – VI (Virtual Instrument). Každý VI se skládá ze dvou sdružených (asociovaných) oken, z čelního panelu (angl. Front Panel) a z blokového diagramu (angl. Block Diagram), který je zdrojovým kódem VI.

5.2 Čelní panel (Front Panel)

5.2.1 Obrazovka čelního panelu

Čelní panel tvoří uživatelské rozhraní zvolené aplikace a určuje její vzhled a chování. Ovládacími a indikačními prvky lze řídit běh aplikace, zadávat parametry a získávat informace o zpracovaných výsledcích. Veškeré objekty je možné libovolně měnit a upravovat, programově nastavovat, automaticky přizpůsobovat velikosti okna po kliknutí pravého tlačítka myši v menu volbou položky **Scale Object With Pane**. Lze také nastavovat velikost okna v závislosti na rozlišení (**File>>VI Properties**) a další volby.

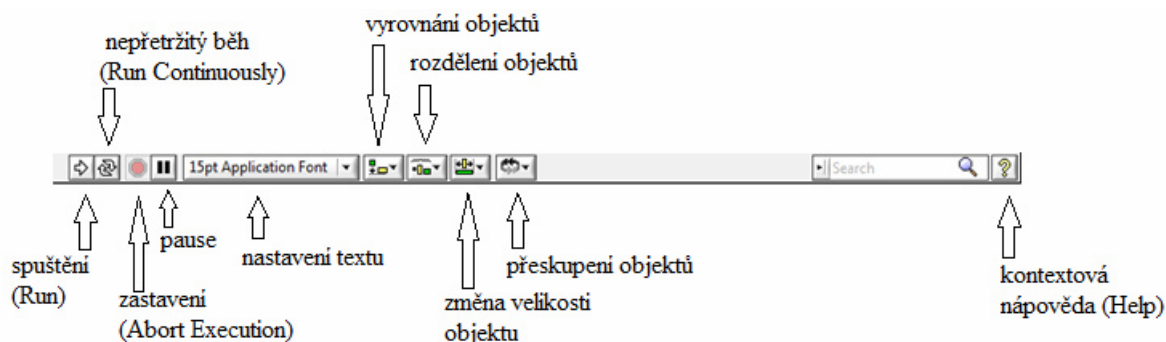
Vizuální prvky se dělí z funkčního hlediska na dvě základní skupiny: vstupy a výstupy. Vstupy mohou mít různé podoby ovladačů (Control), jako je např. tlačítko (Button), otočný knoflík (Knobe), posuvný ovladač (Slide), textový nebo číselný ovladač pro vkládání textů, nebo číselných hodnot (Numeric Control, Text Control) a další. Pro výstupy lze použít různé podoby zobrazovačů (Indicator), jako je např. ručkové měřidlo (Meter), textový či číselný zobrazovač (Text Indicator, Numeric Indicator), kontrolka (LED), proužkový diagram (Progressbar), různé podoby grafů a další. Na čelní panel je možné importovat grafické objekty z jiných aplikací pro použití jako pozadí, vzhled jednotlivých prvků apod. Je možné také použít menu **Edit>>Import Picture to Clipboard**.



Obr. 5 – 2 Jednoduchý příklad čelního panelu

5.2.2 Nástrojová lišta čelního panelu

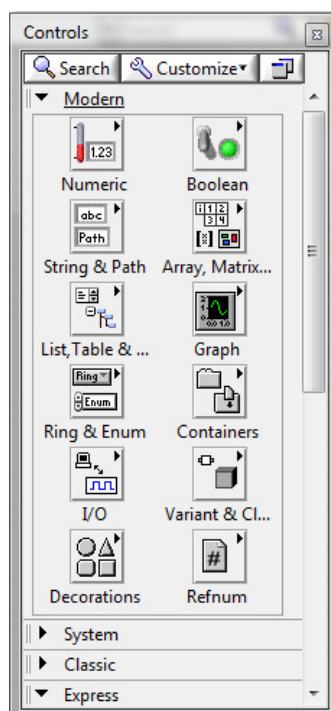
Hlavní prvky pro ovládání a indikaci stavu čelního panelu se nacházejí na nástrojové liště (viz obr. 5 – 3). Všechny mají funkci tlačítka a současně indikátoru pro zobrazení zvoleného stavu.



Obr. 5 – 3 Nástrojová lišta čelního panelu

5.2.3 Prvky čelního panelu

Čelní panel je tvořen grafickými prvky, které jsou určeny pro řízení a ovládání VI, a prvky zobrazování. Ovládací prvky představují vstupní zařízení, umožňující zadávat data a informace do programu.



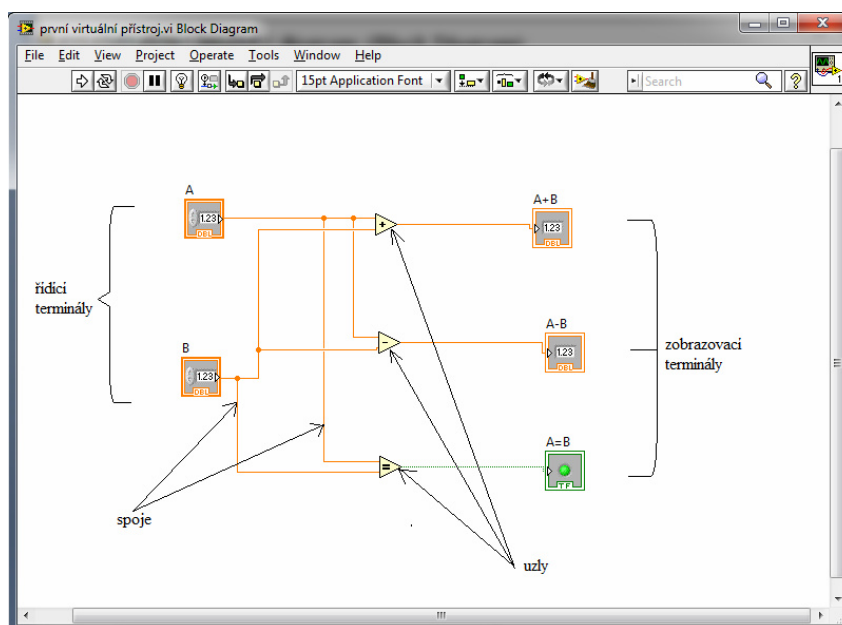
Obr. 5 – 4 Paletové menu prvků čelního panelu

5.3 Blokový diagram (Block Diagram)

5.3.1 Obrazovka blokového diagramu

Obrazovka blokového diagramu je druhým sdruženým oknem každé aplikace. Mezi obrazovkami čelního panelu (Front Panel) a blokového diagramu (Block Diagram) lze přecházet např. stiskem <Ctrl+E>.

Na obrazovce blokového diagramu uživatel definuje vlastní algoritmus programu, tedy propojení prvků z čelního panelu a jejich parametry. Na obrázku 5 – 5 je zobrazen příklad programu VI s popisem tří typů součástí, ze kterých se skládá blokový diagram: uzel, terminál a spoj.

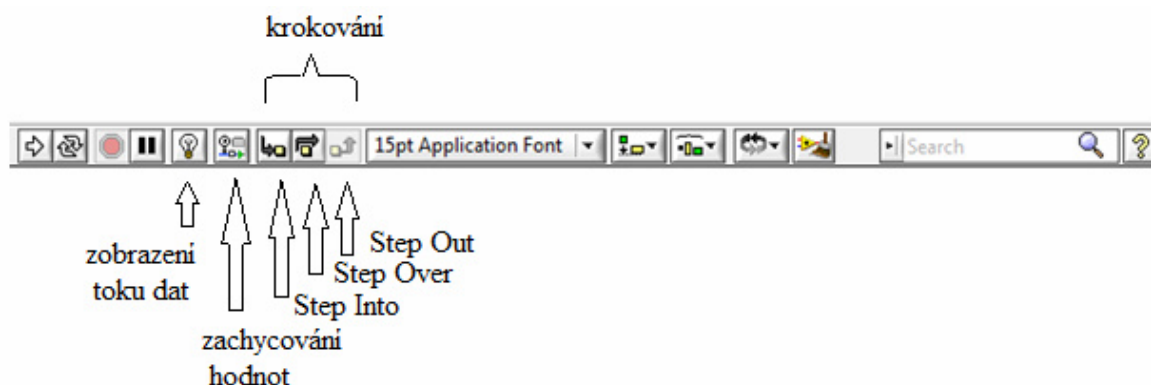


Obr. 5 – 5 Jednoduchý příklad blokového diagramu

5.3.2 Nástrojová lišta blokového diagramu

Hlavní prvky pro ovládání a indikaci blokového diagramu se nacházejí v nástrojové liště (viz obr. 5 – 6). Většina tlačítek nástrojové lišty blokového diagramu má shodnou funkci s tlačítky nástrojové lišty čelního panelu. V nástrojové liště blokového diagramu se nachází dalších pět tlačítek vyobrazených na obrázku 5 – 6. Tato tlačítka jsou určena k ladění programu (debugging). Pro odlad'ování pomocí krokování lze s výhodou použít tří dalších tlačítek. Tlačítkem **Step Into** se spustí vykonání jednoho uzlu, který je současně zvýrazněn. Stiskem

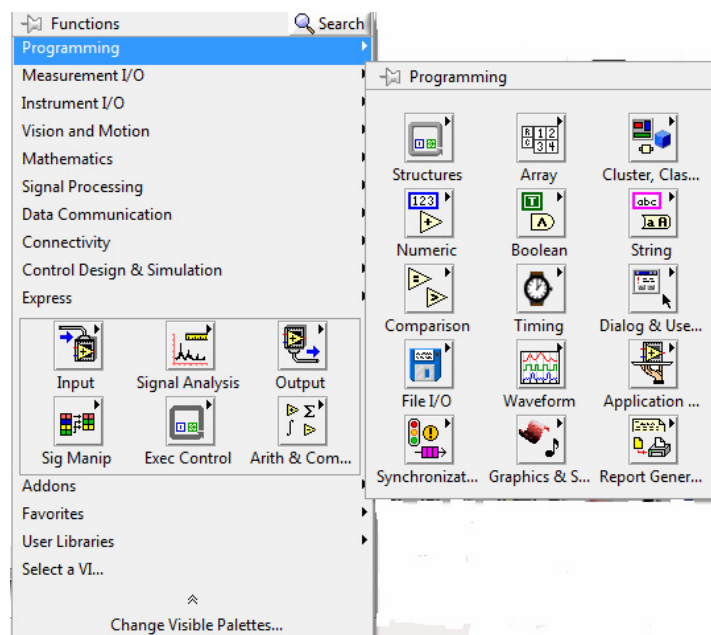
tlačítka **Step Over** se spouští celý uzel jako jeden krok v další hlavní funkci. Stiskem tlačítka **Step Out** se spustí vykonání uzlu jako jeden krok, ale ve volajícím VI nebo struktuře.



Obr. 5 – 6 Nástrojová lišta blokového diagramu

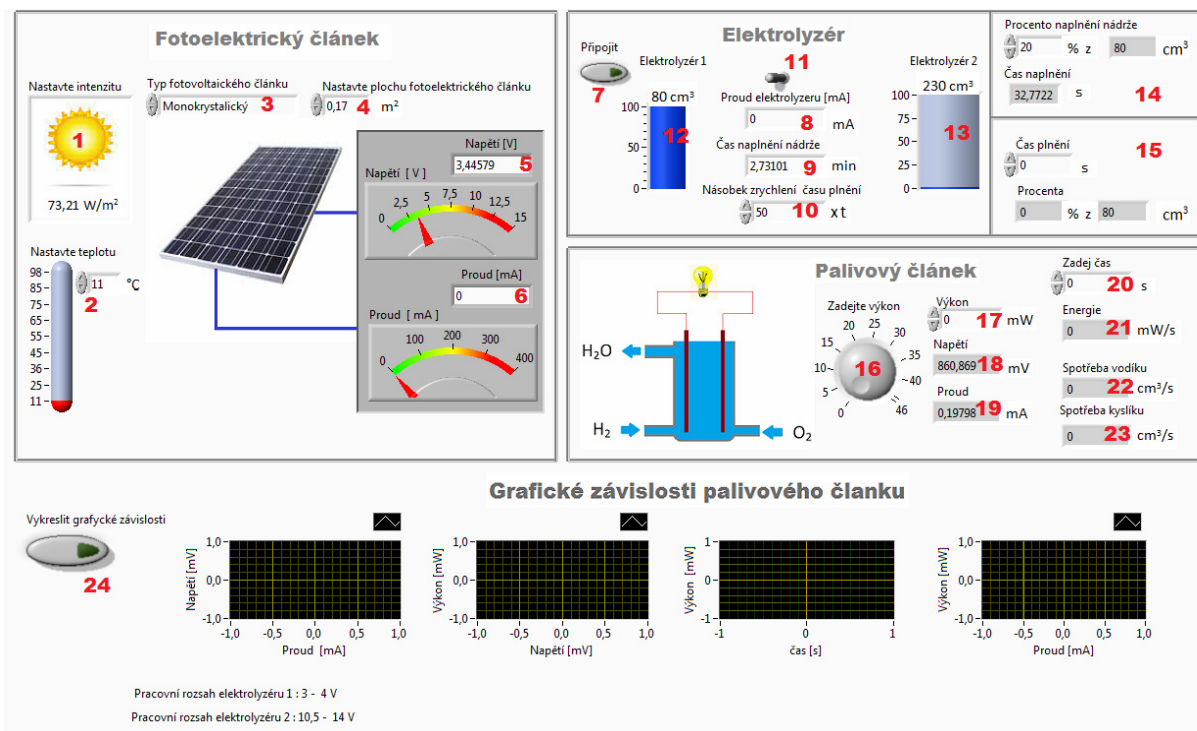
5.3.3 Prvky blokového diagramu

Grafické objekty, které jsou obsahem blokového diagramu, tvoří zdrojový kód programu. Ve skutečnosti je blokový diagram přímo spustitelným kódem, který je překládán během psaní s možností okamžité zpětné vazby při vzniku chyby, jako například při připojení neslučitelných datových typů. Blokový diagram je tvořen vzájemně propojenými objekty vykonávajícími určitou funkci. [16]



Obr. 5 – 7 Paletové menu funkcí a struktur blokového diagramu

6 PRAKTICKÁ REALIZACE MODELU V PROGRAMU LABVIEW



Obr. 6 – 1 Čelní panel vytvořeného modelu v LabVIEW

6.1 Návod k obsluze programu

1. Pomocí tlačítka 1 vybere uživatel požadovanou velikost intenzity . (73,21; 36,6; 16,11 W/m²).
2. Pomocí ovládacího prvku 2 se provede výběr teploty z přednastavených hodnot.
3. Ve výběrovém menu 3 lze zvolit typ fotovoltaického článku (monokrystalický, polykrystalický).
4. V poli 5 se zobrazí napětí generované fotovoltaickým článkem (napětí naprázdno).
5. Činnost elektrolyzérů je omezena následujícími hodnotami napětí:

Elektrolyzér 1: 3-4 V

Elektrolyzér 2: 10,5-14V

6. Tlačítkem 11 uživatel se provede výběr ze dvou typů elektrolyzérů ($80\text{cm}^3/\text{min}$, $230\text{cm}^3/\text{min}$).
7. Stiskem tlačítka 7 dojde při vhodně nastaveném napájecím napětí k výpočtu parametrů elektrolyzéry a současně se spustí grafický indikátor naplnění nádrží 12, 13. Program vypočítá pracovní bod sestavy fotovoltaiického článku a elektrolyzéry a vypočtené hodnoty proudu a napětí zobrazí v příslušných polích (5, 6, 8).

Parametry elektrolyzéry:

- Pole 8- proud elektrolyzéry
 - Pole 9- čas zaplnění celého objemu nádrže během výpočtu
8. V poli 10 je možné nastavit zrychlení plnění nádrže (vzhledem ke skutečnému času).
 9. V poli 14 je možné nastavit libovolné procento naplnění nádrže a stiskem tlačítka 7, dojde k výpočtu času potřebného naplnění nastavených procent objemu nádrže.
 10. V poli 15 je možné nastavit libovolný čas plnění nádrže a stiskem tlačítka 7, dojde k výpočtu objemu naplněného za daný čas.
 11. Nastavovacím prvkem 16 lze zvolit potřebný výkon palivového článku a dojde k výpočtu parametrů palivového článku, které se zobrazí v příslušných polích:
 - Pole 18 napětí palivového článku
 - Pole 19 proud palivového článku
 - Pole 22 spotřeba vodíku
 - Pole 23 spotřeba kyslíku
 12. Pro výpočet vyrobené energie je nutné v poli 20 nastavit čas výroby a v poli 21 se zobrazí hodnota vyrobené elektrické energie (mW/s).
 13. Tlačítkem 24 je možné vykreslit grafické závislosti palivového článku: $U=f(I)$; $P=f(U)$; $P=f(I)$; $P=f(t)$.

6.2 Tvorba programu pro simulaci laboratorní úlohy

Vytvořený program simuluje laboratorní úlohu měření na palivovém článku. Jedná se o soustavu tvořenou fotovoltaiickým článkem, elektrolyzérem a palivovým článkem. Pomocí fotovoltaiického článku je napájen elektrolyzátor, který podle velikosti připojeného napětí začne vyrábět vodík. Vyrobený vodík se spotřebuje v palivovém článku na výrobu elektrické energie.

Tab. 6 – 1 Naměřené hodnoty elektrolyzátoru 65

U [V]	V ₀ [cm ³]	V ₁ [cm ³]	I [A]	t [s]
3	10	40	0,363	339
3,2	10	40	1,053	115
3,4	10	40	2,083	55
3,6	10	40	3,343	35
3,8	10	40	4,483	24

Tab. 6 – 2 Naměřené hodnoty elektrolyzátoru 230

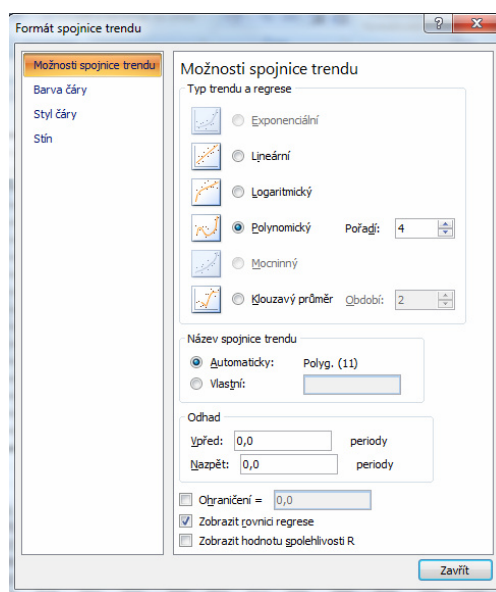
U [V]	V ₀ [cm ³]	V ₁ [cm ³]	I [A]	t [s]
10,6	0	80	0,33	298
11	0	80	0,65	135
11,4	0	80	1,13	74
11,8	0	80	1,73	52
12,2	0	80	2,23	38
12,6	0	80	2,76	31
13	0	80	3,42	25
13,4	0	80	3,91	20

Při simulaci fotoelektrického článku byly použity již naměřené hodnoty z bakalářské práce Ing. Bartošíka. Jedná se o hodnoty naměřené na dvou typech fotovoltaiického článku (monokrystalický, polykystalický), při různých hodnotách intenzity osvětlení a teploty článku. Pro interpolaci hodnot a získání matematického vyjádření průběhů byl použit program MS office excel. V tomto programu byly ze získaných hodnot sestaveny grafické závislosti $U=f(I)$ a $I=f(U)$.

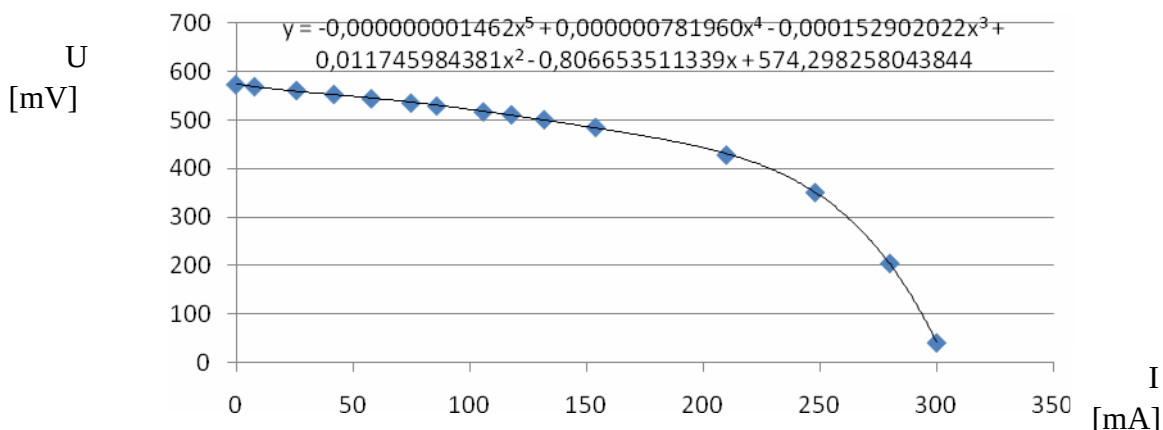
Do vykreslených grafických závislostí byla přidána spojnice trendu (polynomický) a využita možnost zobrazit rovnici regrese. Výsledkem byly polynomy n-tého stupně. Tyto polynomy byly základem výpočtů při vytváření simulačního programu. Stejně tak byly interpolovány i naměřené hodnoty elektrolyzéru a palivového článku. Jako hodnoty palivového článku byly použity již naměřené hodnoty z bakalářské práce Miroslava Zeleného.

Tab. 6 – 3 Hodnoty použité pro simulaci fotovoltaiického článku

E = 50 000 lx		MONOKRYSTALICKÝ (poškozený)																	
teplota		11 °C		25 °C		36 °C		45 °C		55 °C		65 °C		75 °C		85 °C		98 °C	
		U(mV)	I(mA)	U(mV)	I(mA)	U(mV)	I(mA)	U(mV)	I(mA)	U(mV)	I(mA)	U(mV)	I(mA)	U(mV)	I(mA)	U(mV)	I(mA)	U(mV)	I(mA)
		41,4	300	39,1	308	37,8	310	39	310	38	311	40	312	40	314	40	318	40	320
		205	280	125	291	124	297	126	299	126	300	126	300	128	301	128	301	128	301
		351	248	203	280	203	282	204	282	205	285	204	285	206	282	203	280	199	275
		428	210	294	260	292	261	292	260	288	260	283	254	278	250	270	241	259	240
		485	154	347	245	343	241	338	240	330	232	321	229	321	220	301	212	286	200
		501	132	386	225	377	220	370	217	358	210	346	201	334	190	321	188	315	160,2
		511	118	420	200	407	191	397	190	383	166	377	160,2	363	154	348	148	328	139,4
		517	106	455	160	439	154	426	150	408	143	394	138	378	132	362	126	340	119
		529	86	474	134	456	128	442	124	424	120	408	114,4	391	110	374	105	352	98,6
		535	75	493	102	475	98	460	95	441	90,2	424	87,4	406	84	388	80	365	75,8
		544	58	511	72	491	69	475	66,4	456	64	437	61,8	419	59,4	401	56,2	376	53
		553	42	527	40	507	38	490	37	471	36	451	34	433	32,4	413	31,6	388	29,4
		561	26	540	14	521	10	504	9	484	8,2	464	8,2	445	8	425	7,8	399	7
		569	8	543	8	525	0	508	0	489	0	467	0	449	0	428	0	402	0
		573	0	546	0														



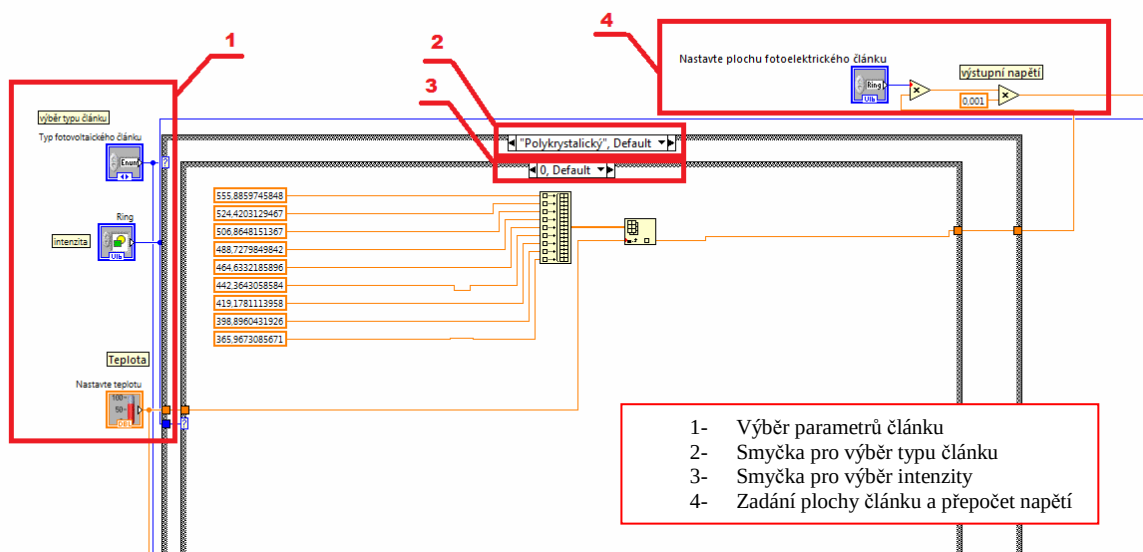
Obr. 6 – 2 Způsob interpolace dat



Obr. 6 – 3 Aproximace průběhů V-A charakteristiky fotovoltického článku polynomem 5. stupně

6.2.1 Smyčky pro výpočet napětí naprázdno fotovoltického článku

Pro výpočet napětí fotovoltického článku naprázdno bylo použito dvou vnořených smyček CASE, a smyčka FOR. Pomocí nadřazené smyčky CASE se nejprve provede výběr typu fotovoltického článku (monokrystalický nebo polykrystalický). S pomocí druhé, vnořené, smyčky CASE se realizuje výběr intenzity dopadajícího záření (73,21; 36,6; 16,11 W/m²). Tato smyčka obsahuje pole hodnot napětí naprázdno získaných interpolací naměřených dat fotovoltického článku. Výběr napětí v závislosti na zadané teplotě je proveden pomocí prvku Index Array, který podle zadané teploty vybere správné napětí fotoelektrického článku. Podle vybrané plochy článku je výsledné napětí násobené příslušným koeficientem a výsledek se vepíše do příslušného pole.



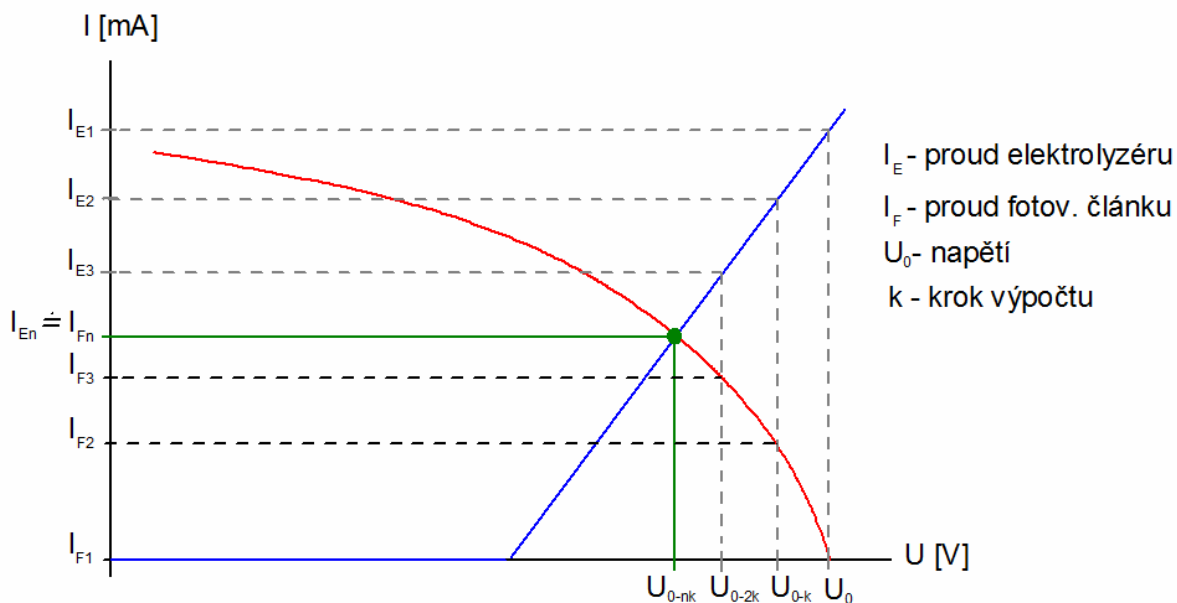
Obr. 6 – 4 Smyčky CASEa FOR pro výpočet napětí naprázdno fotovoltaického článku

6.2.2 Smyčky pro výpočet prac. bodu fotovoltaického čl. a elektrolyzéru

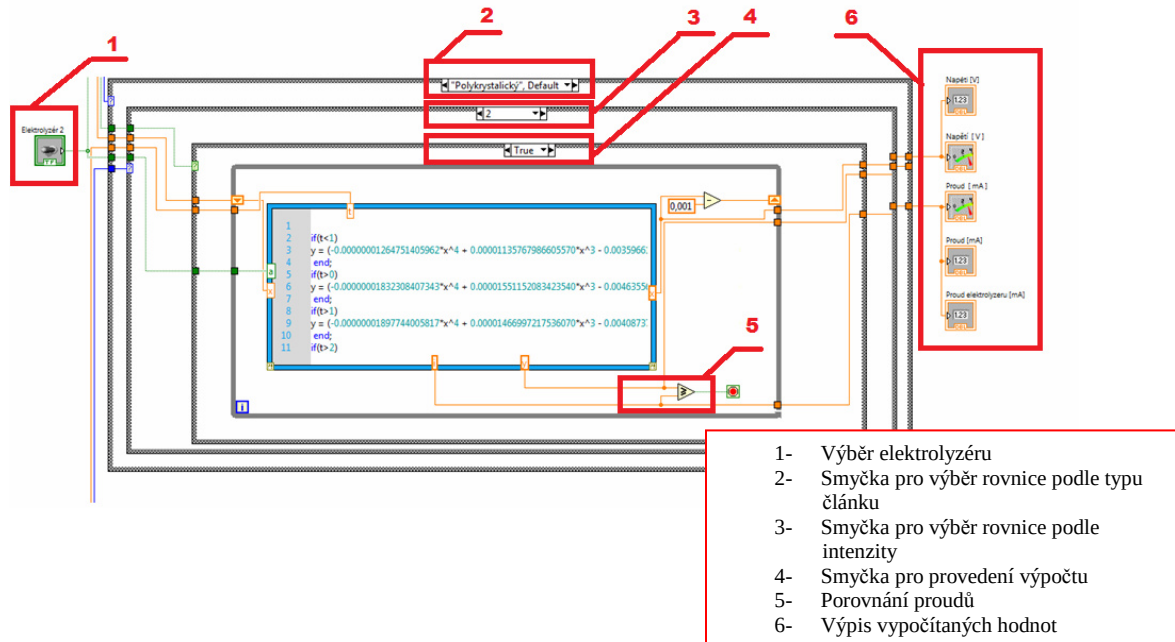
Pro výpočet napětí a proudu pracovního bodu soustavy fotoelektrický článek – elektrolyzér bylo použito tři vnořených smyček CASE, smyčky WHILE a konzole MathScript, která obsahuje rovnice získané interpolací naměřených hodnot a realizuje napěťové omezení práce elektrolyzérů. Pracovní rozsah elektrolyzérů je: elektrolyzér 1: 3-4V; elektrolyzér 2: 10,5-14V. Pokud není nastavené napětí v těchto mezích, výpočet proudů se neprovede.

První smyčka slouží pro výběr správné sady rovnic na základě vybraného typu fotovoltaického článku. Podřazená smyčka provádí výběr na základě nastavené hodnoty intenzity dopadajícího osvětlení. Nejnižší smyčka CASE spustí vlastní výpočet po stisku tlačítka Připojit. Podle nastavených hodnot typu článku, intenzity osvětlení a typu elektrolyzéru se pomocí vnořené smyčky WHILE provede, podle nastavené teploty, výpočet proudů fotovoltaického článku a elektrolyzéru na základě nastavené hodnoty napětí fotovoltaického článku. Oba proudy se navzájem porovnají. Pokud není proud fotovoltaického článku $\geq$ proudu elektrolyzéru, výpočet obou proudů se provede znovu s novou hodnotou napětí sniženou o 0,001. Tento postup se opakuje dokud není splněna podmínka: proud fotovoltaického článku $\geq$ proudu elektrolyzéru. Pokud je tato podmínka splněna, smyčka se ukončí a vypočítané hodnoty napětí a proudu se zapíše do příslušných polí. Výpočet napětí a proudu pracovního bodu je graficky znázorněn na

obrázku níže. Přesnost výpočtu je závislá na dekrementu (kroku), o který se v každém kroku snižuje napětí. Čím nižší tato hodnota bude, tím bude vyšší přesnost výsledku.



Obr. 6 – 5 Výpočet pracovního bodu fotov. článku a elektrolyzáru



Obr. 6 – 6 Smyčka CASE pro výpočet pracovního bodu fotovoltaiického článku a elektrolyzáru

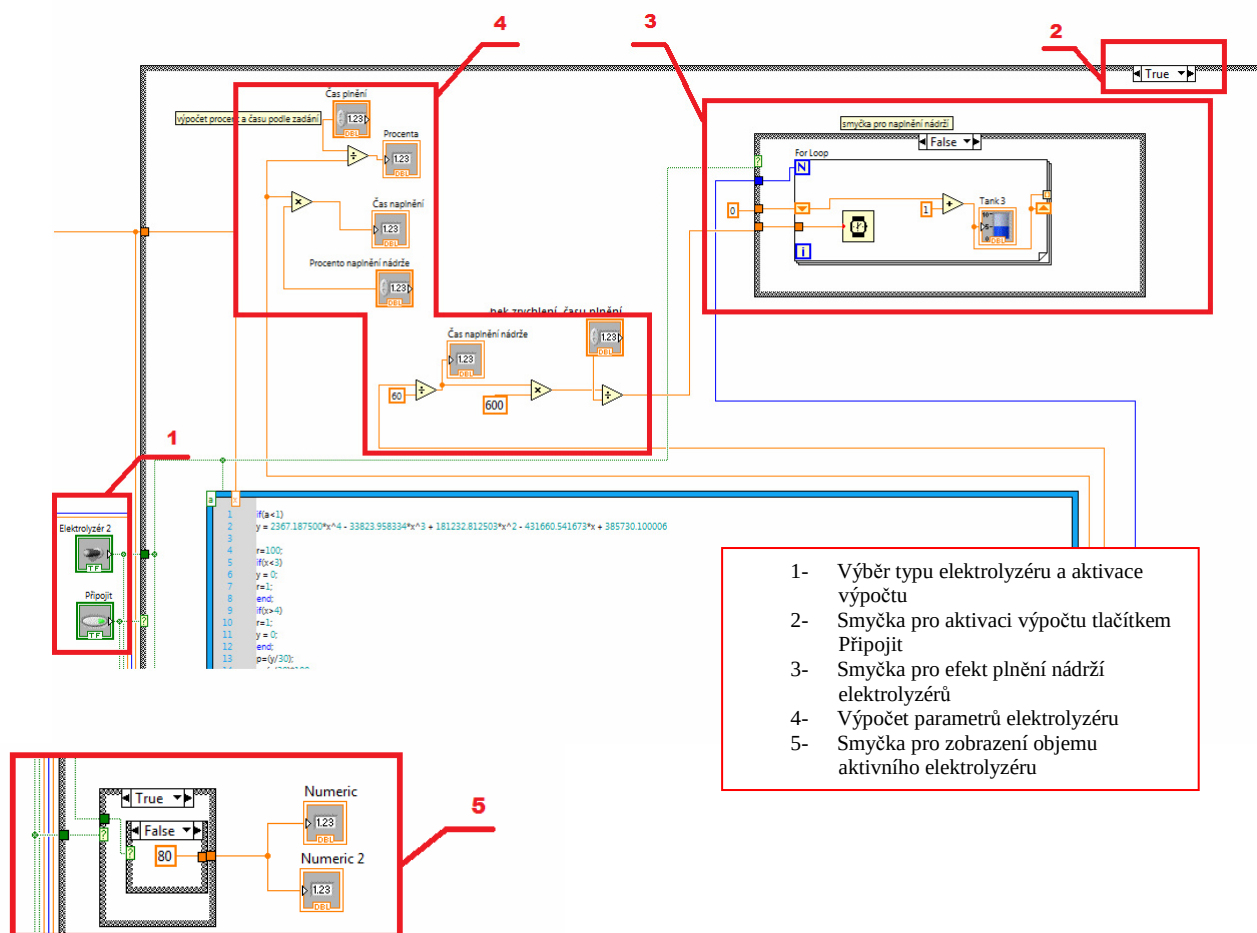
6.2.3 Smyčky pro výpočet parametrů elektrolyzérů

Tato smyčka provádí výpočet času naplnění 100% nádrže elektrolyzérů, výpočet času potřebného k naplnění zadaných procent objemu nádrže elektrolyzérů a také počítá kolik procent objemu se zaplní za určený čas.

Pro realizaci této části program byly použity smyčky CASE, smyčka FOR, pro efekt plnění elektrolyzérů a konzole MathScript. Po výběru jednoho ze dvou možných elektrolyzérů a stisku tlačítka Připojit se provede výpočet času plnění elektrolyzérů na základě znalosti napájecího napětí. Toto napětí musí být v rozsahu: elektrolyzér 1: 3-4V; elektrolyzér 2: 10,5-14V. Pokud toto napětí nebude ve zmíněném rozsahu, výpočet se neprovede a smyčka FOR, která realizuje efekt plnění elektrolyzérů, nebude aktivována. Pokud bude nastavené napětí v daném rozsahu, provede se výpočet času plnění elektrolyzérů na základě rovnice, která byla získána interpolací grafické závislosti: $t=f(U)$. Tento výpočet se provede v konzole MathSkript. Výsledek se přepočte na minuty a zapíše se do příslušného pole.

Konzole MathScript provádí samotný výpočet času plnění, realizuje napěťové omezení a v případě, že je nastaveno potřebné napětí, dává instrukci o počtu cyklů smyčky FOR. Tato smyčka má za úkol demonstrovat plnění nádrže elektrolyzérů. V případě, že není nastaveno potřebné napětí, cyklus smyčky neproběhne. V opačném případě je jako počet cyklu smyčky nastavena hodnota 100. Smyčka poté vykonává 100 cyklů, ve kterých je k počáteční hodnotě 0 přičtena hodnota 1 a výsledek je přiveden do funkce Shift Register, který tuto hodnotu uloží a nastaví jako vstupní hodnotu dalšího cyklu. Současně je tato hodnota přiváděna na indikátor, který symbolizuje nádrž elektrolyzérů. Provedení 100 cyklů = postupné naplnění 100% objemu nádrže elektrolyzérů. Smyčka CASE nadřazené smyčce FOR slouží pro výběr jednoho ze dvou typů elektrolyzérů.

S pomocí matematických funkcí programu LabView byl sestaven jednoduchý program pro výpočet času plnění zadaného objemu nádrže elektrolyzérů a výpočtu zaplněného objemu za libovolný čas. Tento jednoduchý program je zobrazen v poli 4 na obrázku níže. Pro zobrazení celkového objemu aktivního elektrolyzérů bylo použito dvou vnořených smyček CASE. Nadřazená smyčka se aktivuje po stisku tlačítka Připojit. Vnitřní podřazená smyčka pak realizuje výběr správné hodnoty objemu elektrolyzérů v závislosti na poloze tlačítka pro výběr elektrolyzérů.



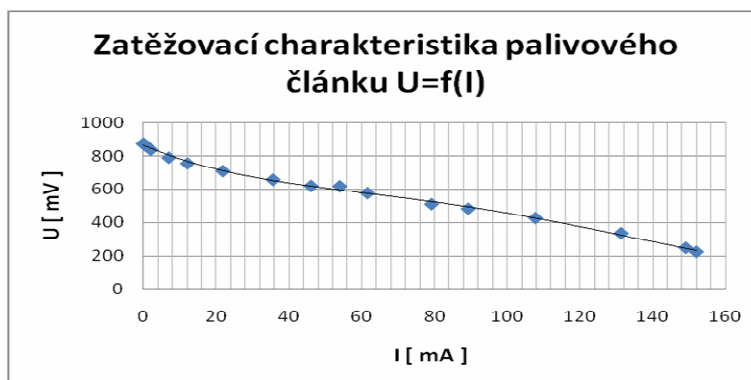
Obr. 6 – 7 Smyčky CASE a FOR pro výpočet času plnění a dalších parametrů elektrolyzérů

6.2.4 Vstupní data palivového článku

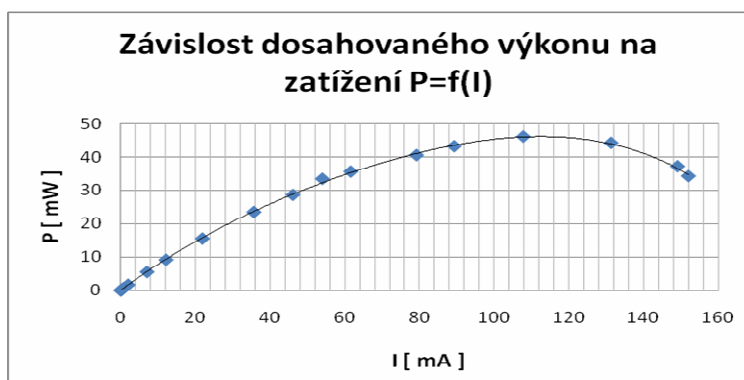
Data pro simulace palivového článku byla získána z bakalářské práce Miroslava Zeleného. Jedná se o hodnoty proudu, napětí a výkonu naměřené na reálném palivovém článku. Tyto hodnoty byly vloženy do programu Microsoft Office Excel, sestaveny grafy a pomocí funkce spojnice trendu (polynomická regrese) byly získány rovnice, které byly použity pro výpočet parametrů palivového článku ve vytvářeném programu.

Tab. 6 – 4 Hodnoty naměřeného napětí, proudu a vypočteného výkonu

U [mV]	I [mA]	P [mW]
873	0	0
872	0,11	0,09592
869	0,26	0,22594
860	0,76	0,6536
837	2,02	1,69074
789	7,01	5,53089
755	12,12	9,1506
709	21,87	15,50583
657	35,65	23,42205
620	46,1	28,582
618	54	33,372
577	61,6	35,5432
511	79,2	40,4712
483	89,3	43,1319
427	107,8	46,0306
336	131,3	44,1168
249	149,1	37,1259
225	152	34,2



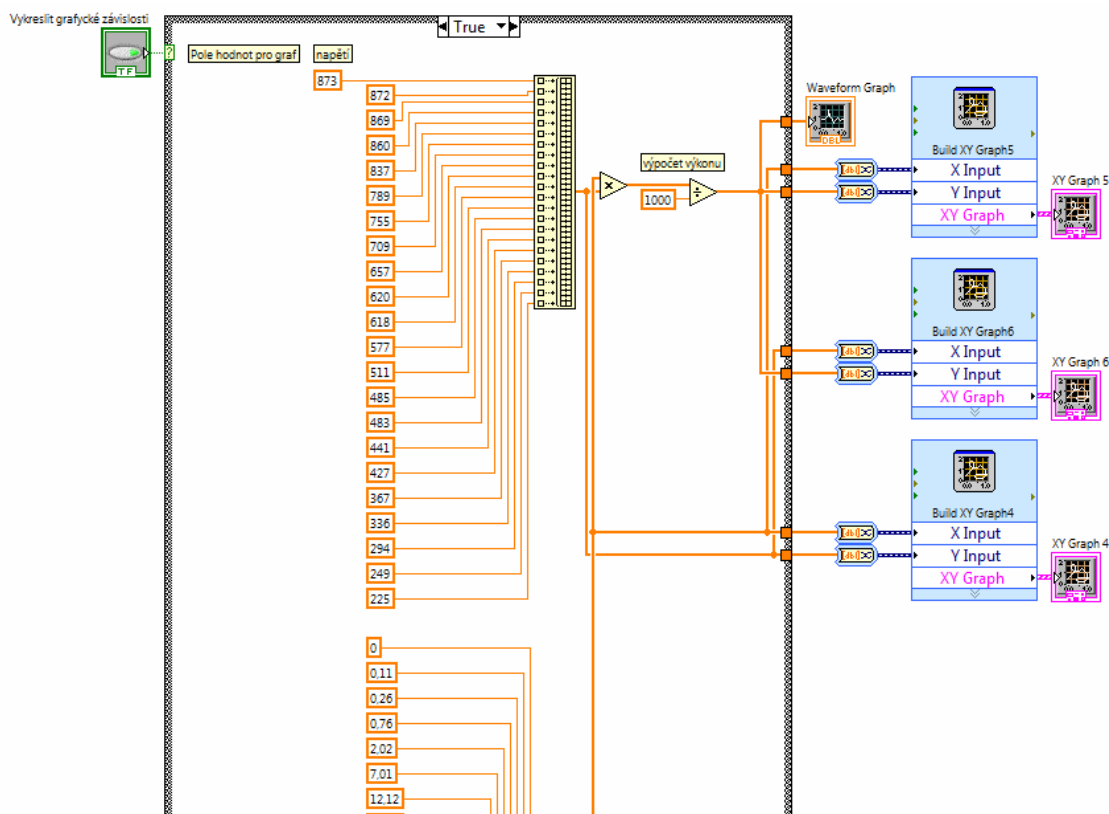
Obr. 6 – 8 Zatěžovací charakteristika experimentálního palivového článku



Obr. 6 – 9 Závislost dosahovaného výkonu na zatížení

6.2.5 Smyčka pro vykreslení charakteristik palivového článku

Pro vykreslení grafických závislostí palivového článku byla použita smyčka CASE, která obsahuje pole hodnot, napětí a proudů, naměřených na palivovém článku. Podmínkou aktivace této smyčky je stisk tlačítka *Vykreslit grafické závislosti* ve front panelu programu. Po stisku tohoto tlačítka dojde k vykreslení následujících grafických závislostí: $U=f(I)$; $P=f(U)$; $P=f(I)$; $P=f(t)$. Výkon palivového článku je získán výpočtem podle vzorce $P=U \cdot I$. Výsledek je pomocí matematického dělení konstantou 1000 převeden na jednotky mW. Pro vykreslení žádaných závislostí bylo použito dvou typů grafů. Graf XY, který vykreslí závislost dvou vybraných veličin ($U=f(I)$, $P=f(U)$, $P=f(I)$) a Waveform graf, který vykresluje závislost vybrané veličiny na čase ($P=f(t)$).



Obr. 6 – 10 Smyčka CASE pro zobrazení grafických závislostí palivového článku

6.2.6 Výpočet parametrů palivového článku

Pro výpočet parametrů palivového článku byl sestaven program, jehož blokové schéma je na následujícím obrázku. Základem této části programu je struktura MathScript, do které byly vloženy rovnice vzniklé polynomickou interpolací získaných dat palivového článku. Na základě zadaného výkonu se v této konzole vypočte odpovídající proud a napětí palivového článku.

Výsledky se zobrazí v příslušných indikátorech. Po zadání času se dále vypočítá i vyrobená elektrická energie. Vypočítaný proud se dále převede na základní jednotku a na jeho základě se vypočítá spotřeba vodíku a kyslíku při provozu palivového článku. Pro sestavení výpočtu byly použity standardní matematické funkce, které program LabView nabízí (násobení, dělení a mocninná funkce). Celý výpočet je sestaven na základě těchto rovnic:

Počet elektronů N_e prošlých obvodem při zadané hodnotě proudu za 1 s:

$$N_e = \frac{I}{e} \quad (6.1)$$

Kde: e [C]- náboj elektronu

I [A]- proud palivového článku

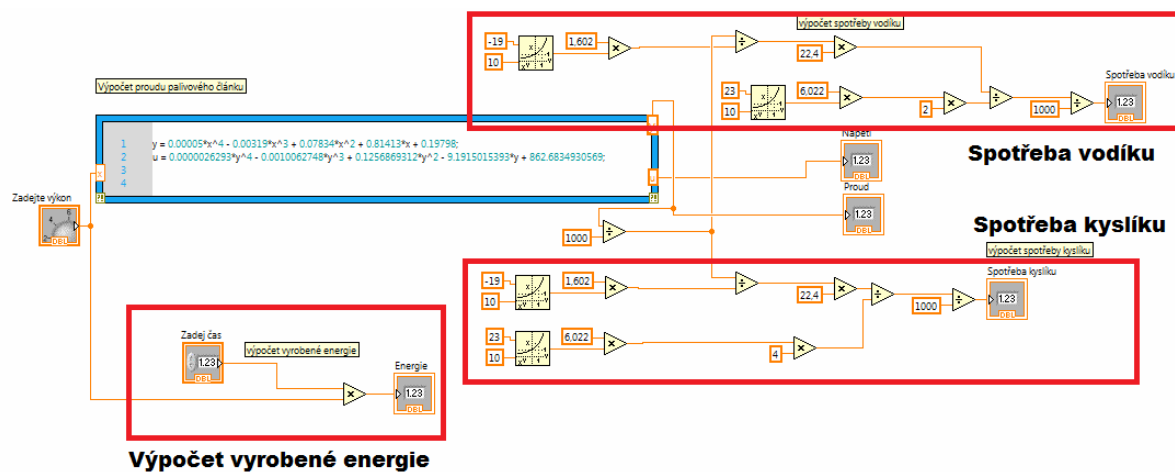
$$\text{Spotřeba } H_2 = \frac{N_e \cdot V_m}{2 \cdot N_A} \quad (6.2)$$

$$\text{Spotřeba } O_2 = \frac{N_e \cdot V_m}{4 \cdot N_A} \quad (6.3)$$

Kde: V_m - molární objem ideálního plynu při standardních podmínkách

N_A - Avogadrova konstanta

[18]



Obr. 6 – 11 Výpočet parametrů palivového článku

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce splnila své stanovené cíle. Hlavním cílem práce bylo vytvoření přehledu o palivových článcích, jejich vlastnostech a možnostech použití pro praxi a laboratorní výuku. Dále také vytvořit v programu LabVIEW simulaci modelu laboratorní úlohy pro měření charakteristik kyslíkovodíkového palivového článku, na základě naměřených a získaných dat.

V prvních kapitolách práce rozebírá všeobecně palivové články. Z dostupných materiálů jsem vybral důležité informace, charakterizující palivové články. Okrajově jsem nahlédl do jeho historie. Snažil jsem se co nejsrozumitelněji popsat jejich princip činnosti, strukturu a všechny součásti potřebné pro správnou funkci. Pro lepší orientaci jsem rozdělil palivové články podle jednotlivých typů na několik kategorií.

Třetí kapitola je zaměřena na kyslíkovodíkový palivový článek. Věnuji se v ní kyslíku a vodíku jako základním prvkům a jejich vlastnostem, které pak určují i vlastnosti kyslíkovodíkového palivového článku. Všeobecné principy činnosti jsem aplikoval na konkrétní typ palivového článku. Kapitulu uzavírá termodynamika.

Čtvrtá kapitola je podle mého názoru pro čtenáře nezajímavější. Pojednává o zajímavostech, jak se dá palivový článek využít v praxi a v laboratorní výuce. Vzhledem ke zhoršujícímu se životnímu prostředí a v neposlední řadě také ztenčujícím se světovým zásobám ropy, nalézá palivový článek bohaté využití jako alternativní zdroj energie, a to převážně v automobilovém průmyslu.

Samostatnou kapitolu tvoří program LabVIEW. Obecně jsem popsal jak program funguje a co se v něm dá vytvořit. S nadsázkou lze říct, že nemá omezení svého použití. V druhé části jsem se věnoval základním strukturám a prvkům, se kterými program pracuje. Najdeme zde nabídku a možnosti úvodní obrazovky, čelního panelu a blokového diagramu. Detailněji je program popsán v rámci praktické části.

V praktické části bakalářské práce jsem vytvořil simulaci laboratorní úlohy v programu LabVIEW. Zde jsem rozepsal celý postup tvoření matematického modelu. Jedná se o soustavu tvořenou fotovoltickým článkem, elektrolyzérem a palivovým článkem. Při práci jsem narazil na určité problémy. V první řadě vstupní hodnoty pro fotovoltický článek byly změřeny jen pro tři hodnoty intenzit dopadajícího záření. Tento počet je nedostačující pro interpolaci, a proto lze intenzitu osvětlení ve vytvořeném programu nastavovat pouze skokově. Dále data, které jsem použil pro fotovoltický panel byly změřeny pouze na jednom článku, proto bylo nutné tyto

hodnoty přepočítat na vyšší počet. Tím byla získána potřebná velikost napětí pro fungování elektrolyzéru. Interpolace dat pomocí programu Excel způsobuje určitou chybu, která je závislá na počtu desetinných míst. Proto jsem musel u jednotlivých koeficientů použít více než 6 desetinných míst, a tak se tato chyba stala zanedbatelnou. Jistou nevýhodou byl také pracovní rozsah napětí elektrolyzéru. Model jsem musel tomuto rozsahu přizpůsobit. Napětí vyráběné fotovoltaickým panelem nebylo využito v celém rozsahu.

Laděním programu by se dal model určitě vylepšit. Mám namysli především plynulé nastavování hodnot fotovoltaického článku a teploty, použitím jiných elektrolyzérů s větším pracovním rozsahem napětí, volbou velikosti nádoby na vyrobený vodík nebo by program mohl ještě počítat pod jakým tlakem je vodík vytlačován do nádoby. I přes všechny tyto nedostatky a problémy, program funguje správně a počítá hodnoty shodné s hodnotami naměřenými a získanými.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BALAJKA, J. *Vodík a jiné nové nosiče energie*. Bratislava : ALFA , 1982.
- [2] VANĚK, J.; KŘIVÁK, P.; NOVÁK, V. *Alternativní zdroje energie*. Brno : VUT, 2006.
- [3] *Nekonvenční přeměny energie*. Brno : VUT
- [4] IEEE – světová asociace pro technologický pokrok [on-line]. Dostupné z WWW: <<http://www.ieee.org/portal/site>>.
- [5] Science Direkt [on-line]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- [6] Wikipedie otevřená encyklopedie [on-line]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavní_strana>.
- [7] National Instruments [on-line]. Dostupné z WWW: <<http://www.ni.com/labview/>>
- [8] Pandatron.cz – elektronický magazín [on-line]. Dostupné z WWW: <http://pandatron.cz/?592&zaciname_s_labview>.
- [9] HAVLÍČEK, J.; VLACH, M.; VLACH, J.; VLACHOVÁ, V. *Začínáme s LabVIEW*. BEN – technická literatura 2008 [on-line] Dostupná ukázka z knihy z WWW: <http://www.ben.cz/_d/ukayka/121299u.pdf>
- [10] BOUČEK, J. *Sluneční energie, Obnovitelné zdroje energie*. Praha : Agrospoj, 1993
- [11] Ballard [on-line]. Dostupné z WWW: <www.ballard.com>
- [12] Chemický vzdělávací portál [on-line] Dostupné z WWW: <<http://chemie.gfxs.cz/>>
- [13] Technet.cz; JANÍK, L.; DLOUHÝ, P. *Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku* [on-line] Dostupné z WWW: <<http://technet.idnes.cz/>>
- [14] Biom.cz; BENEŠ, Š. C. *Energetické využití palivových článků*. [online] Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz-spalovani-biomasy/odborne-clanky/energeticke-vyuziti-palivovych-clanku>>
- [15] Katedra teoretické elektrotechniky, Palivové články [on-line] Dostupné z WWW: <<http://faraday.fel.zcu.cz>>
- [16] VLACH, J. ; HAVLÍČEK, J. ; VLACH, M. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vydání. Praha : BEN Technická literatura, 2008. 248 s. Dostupné z WWW: <<http://shop.ben.cz/121299>>. ISBN 978-80-7300-245-9.

- [17] BARTOŠÍK, T. *Vliv provozních podmínek na zatěžovací charakteristiky fotovoltaiického generátoru*. Brno, 2006. 46 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [18] ZELENÝ, M. *Nízkoteplotní palivové články*. Brno, 2009. 71 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [19] *California Fuel Cell Partnership* [online]. 2009. Vehicles. Dostupné z WWW: <<http://www.fuelcellpartnership.org/home>>.
- [20] *New scientist* [online]. 2009. New scientist Tech. Dostupné z WWW: <www.newscientist.com>.
- [21] *H-tec* [online]. 2010 . h-tec. Dostupné z WWW: <<http://www.h-tec.com/en/university>>.

PŘÍLOHY

Příloha A – CD-R s modelem v LabVIEW