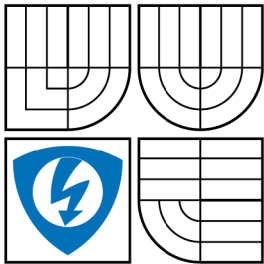


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**PARCIÁLNÍ ŘEŠENÍ HYBRIDNÍHO SYSTÉMU
S NÍZKOTEPLNÍMI PALIVOVÝMI ČLÁNKY
A OBNOVITELNÝMI ZDROJI**

PARTIAL SOLUTION OF HYBRID SYSTEM WITH LOW-TEMPERATURE
FUEL CELLS AND RENEWABLE SOURCES

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MICHAL PTÁČEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTONÍN MATOUŠEK, CSc.

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DISERTAČNÍ PRÁCE

předložená k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.)

ve studijním oboru
SILNOPROUDÁ ELEKTROTECHNIKA A ELEKTROENERGETIKA

Ing. Michal Ptáček

PARCIÁLNÍ ŘEŠENÍ HYBRIDNÍHO SYSTÉMU S NÍZKOTEPLNÍMI PALIVOVÝMI ČLÁNKY A OBNOVITELNÝMI ZDROJI

Školitel: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

Datum odevzdání práce: 11. listopad 2014

Práce je k dispozici v Areálové knihovna FEKT, Technická 12, 616 00 Brno

Bibliografická citace

Ptáček, M. *Parciální řešení hybridního systému s nízkoteplotními palivovými články a obnovitelnými zdroji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 156. s

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně a že jsem použil podklady, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury, respektive v seznamu vlastních publikací.“

V Brně dne 11. listopadu 2014

Michal Ptáček

Poděkování

„Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli doc. Ing. Antonínu Matouškovi, CSc. za jeho vedení během mého doktorského studia. Dále děkuji doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. a doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za udílení cenných rad při řešení odborných nebo výzkumných projektů a při zpracování disertační práce. Poděkování samozřejmě patří i celému kolektivu Ústavu elektroenergetiky fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií na Vysokém učení technickém v Brně. Na tomto místě bych také rád poděkoval svým kamarádům Tomášovi Pavelkovi, Janu Novotnému, Janu Macháčkovi a Lukáši Radilovi. V neposlední řadě mé rodině, mým nejbližším a Kateřině Hájkové za jejich trpělivost a podporu během mého studia.“

Michal Ptáček

Abstrakt

Práce se zabývá principy funkce nízkoteplotního palivového článku s polymerním elektrolytem (PEMFC), fotovoltaického zdroje (FVE) a větrného zdroje energie (VTE) a řeší jejich podrobná matematická vyjádření. V rámci práce jsou jednotlivé zdroje simulovány a jejich modely jsou podrobeny důkladné analýze. Samotnému simulování předchází seznámení se s významnými historickými milníky ve vývoji palivových článků. Dále je provedena základní klasifikace palivových článků a jsou uvedeny charakteristické vlastnosti článků používaných v energetice. V práci jsou také uvedeny informace o projektech, které řeší implementaci PEMFC jako primárního nebo doplňkového zdroje energie. Ve spojitosti s nastíněnou možností uplatnění nízkoteplotních palivových článků, jako vodíkové technologie v blízké budoucnosti, jsou pro komplexnost představeny i základní metody výroby vodíku a možnosti jeho skladování. Práce je výhradně zaměřena na zdokonalení matematických modelů PEMFC, které v rámci hybridního systému kooperují s obnovitelnými zdroji energie (OZE). Součástí práce je proto krátké review jednotlivých provozovaných nebo modelovaných konceptů hybridních systémů v energetice, na kterých jsou specifikovány hlavní nedostatky modelů PEMFC nebo systému jako celku. Specifikace nedostatků vede k vytvoření nového zdokonaleného dynamického modelu palivového článku, který umožňuje analýzu vývoje elektrických a neelektrických veličin v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Dále jsou zde představeny výsledky tepelných experimentů a dynamického chování palivového článku, které byly získány pomocí modelu rozšířeného ještě o reformér a DC/DC konvertor. V práci je dále vytvořen model fotovoltaického modulu, který je založen na parametrizaci výhradně ze štítkových hodnot a který je podroben základním experimentům s využitím reálně změřených hydrometeorologických dat. V případě, že hybridní systém využívá OZE, je dobré znát vývoj atmosférických podmínek v místě instalace těchto zdrojů. Konkrétně pro FVE je možné využít veřejně dostupných databází obsahující informace o hodnotách dopadajícího slunečního záření pro zvolenou lokalitu. Veřejné databáze často slouží pro prvotní návrh a výrobní možnosti FVE. V reakci na to je v práci provedeno zhodnocení relevance těchto databází, a to na základě konfrontace s dlouhodobě reálně měřenými daty, jež jsou využita pro zmíněné experimenty fotovoltaického modulu. Částečně je zde také řešena problematika větrného zdroje energie. V této souvislosti je zde popsán a simulován pouze zjednodušený model VTE. V navazující práci pak lze vytvořené modely subsystémů všeobecně implementovat jako parciální vstupy hybridního systémů.

Práce byla zpracována v Centru výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie (CVVOZE) za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci projektu č. LO1210 - Energie v podmínkách udržitelného rozvoje (EN-PUR) a v rámci projektu specifického výzkumu č. FEKT-S-14-2520 - Nové technologie pro udržitelnou elektroenergetiku a dále za finanční podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu č. TA03020523 - Dynamický model distribuční sítě.

Klíčová slova

Nízkoteplotní palivový článek; PEMFC; Hybridní systém; Obnovitelné zdroje energie; OZE; Simulace; Model; Fotovoltaický zdroj energie; FVE; Větrný zdroj; VTE; Atmosférické podmínky

Abstract

The thesis deals with the principle functions of low-temperature fuel cells with proton exchange membrane (PEMFC), photovoltaic sources (PVPP) and wind energy sources (WPP), along with solving their detailed mathematical expressions. In this work, the individual sources and their simulated models are analyzed in depth. The actual simulation is preceded by familiarization with important historical milestones in the development of fuel cells. Furthermore there is a basic classification of fuel cells and the characteristics of the cells used in the energy sectors. The text also provides information on projects that address the implementation of PEMFC as a primary or supplementary source of energy. Along with outlining the options for PEMFC as a perspective hydrogen technologies in the near future, the basic methods of hydrogen production and storage options are presented for the complexity. The work is exclusively focused on improving PEMFC mathematical models that under the hybrid system cooperate with renewable energy sources (RES). Part of the theses contains a short review of run or modeled concepts of hybrid systems in the energy sector. Using these models the main deficiencies of the models or of the whole PEMFC system can be identify. Specifications of the deficiencies lead to the creation of a new advanced dynamic PEMFC model that allows an analysis of the development of electrical and non-electrical quantities using long term tests. Furthermore, the thesis presents results of the experiments of thermal and dynamic behavior PEMFC, which were obtained from the additionally extended model with a reformer and the DC/DC converter. In this text there is a model of a photovoltaic module created, which is based on the nominal values parameterization. The model is subjected to basic experiments in which measured hydrometeorological data are used. If the hybrid system utilizes renewable energy sources, it is good to know the evolution of atmospheric conditions in the installation of these resources. Specifically for PVPP, publicly available databases containing information about solar radiation levels can be used for the selected location. Public databases are often used for initial design and manufacturing options for PVPP. An evaluation of the relevancy of public databases is performed based on a long-term observation of real measured data. Furthermore, these data are used for experiments on the photovoltaic module. Partially the text addresses the issue of the wind energy sources, however, it is simulated only on a simplified model of WPP. Created models of subsystems can be generally implemented as partial inputs hybrid systems in the future work.

The thesis was developed at Centre for Research and Utilization of Renewable Energy (CVVOZE) with the financial support of the National Programme for Sustainability and the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under the project no. LO1210 - Energy for Sustainable Development and the project no. FEKT-S-14-2520 - New Technologies for Sustainable Development of Electrical Power Systems. The thesis was also generated under the project no. TA03020523 - Dynamic model of distribution network with the financial support of Technology Agency of the Czech Republic.

Keywords

Low-temperature fuel cell; PEMFC; Hybrid system; Renewable energy sources; RES; Simulation; Model; Photovoltaic energy source; PVPP; Wind energy source; WPP; Atmospheric conditions

Obsah

Bibliografická citace	iii
Čestné prohlášení	iii
Poděkování	iv
Abstrakt	v
Klíčová slova	v
Abstract	vi
Keywords	vi
Obsah	vii
Seznam ilustrací a obrázků	x
Seznam tabulek	xiii
Seznam použitých symbolů a zkratk	xiv
1 Úvod	1
2 Současná technologie palivových článků	3
2.1 Historie a blízká budoucnost palivových článků	3
2.2 Klasifikace palivových článků	5
2.2.1 Palivový článek s polymerním elektrolytem	6
2.2.2 Palivové články s elektrolytem s kyselinou fosforečnou	6
2.2.3 Palivové články s roztavenými uhlíčitany	7
2.2.4 Palivové články s tuhými oxidy	7
2.3 Současný stav využití PEMFC	8
2.3.1 PEMFC jako primární zdroj	8
2.3.2 PEMFC jako doplňkový zdroj	9
3 Hybridní systémy a současný stav	11
3.1 Koncept hybridního systému	11
3.1.1 Provozované hybridní systémy	11
3.2 Simulace PEMFC hybridních systémů a jejich nedostatky	12
3.2.1 Nedokonalosti modelů PEMFC a PEMFC hybridních systémů	13
4 Současná výroba vodíku	17
4.1 Základní metody výroby	17
4.1.1 Parní reformování	18
4.1.2 Parciální oxidace	20
4.1.3 Zplyňování	21
4.1.4 Termochemické cykly	21
4.1.5 Elektrolýza	22
4.1.6 Vysokoteplotní elektrolýza	22

4.1.7	Jiné způsoby výroby	23
4.2	Skladování vodíku	23
4.2.1	Plynné skupenství	24
4.2.2	Kapalné skupenství	24
4.2.3	Pevné látky	24
4.2.4	Jiné způsoby skladování	25
5	Cíle disertační práce	26
5.1	Specifikace nedostatků současných systémů a modelů	26
5.2	Návrh a tvorba nového modelu PEMFC	26
5.3	Analýza provozních stavů PEMFC	26
5.4	Návrh komplexního modelu fotovoltaického modulu	27
5.5	Analýza navrženého fotovoltaického modelu	27
5.6	Analýza výkonové dostupnosti fotovoltaického zdroje a ověření vhodnosti veřejné databáze	27
5.7	Model větrného zdroje energie	27
6	Palivový článek PEMFC a jeho simulace	28
6.1	Princip palivového článku	28
6.2	Konstrukce a technické provedení	29
6.2.1	Polymerní membrána	32
6.3	Popis vstupních parametrů palivového článku	34
6.3.1	Výstupní napětí PEMFC	37
6.3.2	Napěťové ztráty PEMFC	38
6.3.3	Parciální tlaky reaktantů v PEMFC	41
6.3.4	Teplota PEMFC	42
6.4	Nový komplexní model PEMFC	44
6.4.1	Stanovení aktivačních ztrát	45
6.4.2	Stanovení ohmických ztrát	46
6.4.3	Stanovení koncentračních ztrát	47
6.4.4	Stanovení parciálních tlaků a jejich regulace	47
6.4.5	Stanovení teplotní závislosti	51
6.5	Analýza ustáleného stavu PEMFC	52
6.5.1	Vliv změny parciálního tlaku	53
6.5.2	Vliv změny provozní teploty	54
6.5.3	Vliv změny koncentrace reaktantů	55
6.5.4	Vliv hydratace membrány	55
6.6	Analýza dynamického chování PEMFC	56
6.6.1	Samostatný model PEMFC - I. část	57
6.6.2	Model PEMFC, reformér a regulace - II. část	60
6.6.3	Model PEMFC, reformér, regulace a DC/DC konvertor - III. část	66
7	Fotovoltaický článek a jeho simulace	72
7.1	Princip fotovoltaického článku	72
7.1.1	Pásové energetické schéma a dotování	72
7.1.2	Energie elektromagnetického záření	74
7.2	Druhy fotovoltaických článků	75
7.2.1	Monokrystalické články	75
7.2.2	Polykrystalické články	76

7.2.3	Ostatní články	76
7.3	Popis vstupních parametrů fotovoltaického modulu	77
7.4	Stanovení sériového a paralelního odporu	81
7.5	Matematický model fotovoltaického modulu	83
7.5.1	Verifikace modelu na změny provozní teploty	83
7.5.2	Verifikace modelu na změny intenzity slunečního záření	84
7.5.3	Stanovení faktoru plnění	86
7.5.4	Aplikace verifikovaného modelu	87
7.6	Výkonová disponibilita a vhodnost veřejných databází	88
7.7	Simulace fotovoltaického subsystému	94
8	Větrný zdroj energie a jeho simulace	98
8.1	Princip funkce větrného zdroje energie	98
8.2	Druhy větrných zdrojů energie	98
8.3	Popis vstupních parametrů a simulace	99
8.3.1	Aerodynamický model a popis generátoru	99
8.3.2	Stanovení rychlosti větru	104
8.3.3	Model větrného zdroje - I. přístup	105
8.3.4	Model větrného zdroje - II. přístup	107
9	Závěr	110
9.1	Splnění jednotlivých cílů práce	110
9.1.1	Specifikace nedostatků současných systémů a modelů	111
9.1.2	Návrh a tvorba nového modelu PEMFC	111
9.1.3	Analýza provozních stavů PEMFC	112
9.1.4	Návrh komplexního modelu fotovoltaického modulu	112
9.1.5	Analýza navrženého fotovoltaického modelu	112
9.1.6	Analýza výkonové dostupnosti fotovoltaického zdroje a ověření vhodnosti veřejné databáze	112
9.1.7	Model větrného zdroje energie	112
9.2	Souhrn nových poznatků a vlastní přínos	113
9.3	Praktické využití	114
9.4	Návrh dalšího řešení	115
	Rejstřík	116
	Použitá literatura	117
	Publikace autora	128
	Curriculum Vitae	131

Seznam ilustrací a obrázků

3.1	Ekvivalentní elektrický obvod charakterizující dynamiku palivového článku (modifikováno z [39])	14
4.1	Zjednodušené schéma základních metod výroby vodíku z fosilních paliv (převzato z [4])	17
4.2	Systém výroby vodíku parním reformováním (modifikováno z [44]) . . .	18
4.3	Základní schéma SMR a následné konverze oxidu uhelnatého (převzato z [4])	20
4.4	Zjednodušené schéma vysokoteplotní elektrolýzy (převzato z [4])	23
6.1	Schématické znázornění toků jednotlivých reaktantů a produktů základních chemických reakcí nízkoteplotního palivového článku PEMFC (převzato z [4])	28
6.2	Konstrukční schéma řazení jednotlivých palivových článků do palivového modulu (převzato z [4])	30
6.3	Serpentinové řešení rozvodných kanálů bipolární desky z grafitových polymerů (převzato z [4])	30
6.4	Detailní náhled na rozhraní elektrolyt, porézní elektroda, katalyzátor (modifikováno z [64])	31
6.5	Detailní náhled na molekulu nafion membrány nízkoteplotních PEMFC (modifikováno z [13])	33
6.6	Detailní náhled na molekulu poly(2,5-Benzimidazol) membrány s označením ABPBI (modifikováno z [13])	34
6.7	Schématické znázornění toků energií u ideálního nízkoteplotního palivového článku PEMFC (převzato z [4])	35
6.8	Vliv změny jednotlivých provozních parametrů palivového článku na jeho výstupní napětí (modifikováno z [71])	37
6.9	Ekvivalentní elektrický obvod parciálních tlaků jednotlivých reaktantů v palivovém článku (modifikováno z [76])	42
6.10	Ekvivalentní elektrický obvod charakterizující termodynamické vlastnosti uvnitř palivového článku (modifikováno z [42])	43
6.11	Blokové uspořádání nového komplexního modelu PEMFC [35]	44
6.12	Vliv změny parciálního tlaku vodíku p_{H_2} palivového článku na průběh jeho V-I charakteristiky pro konstantní teplotu $T = 343,15$ K a parciální tlaky $p_{O_2} = 1,0$ atm a $p_{H_2O} = 1,0$ atm	53
6.13	Vliv změny provozní teploty palivového článku na průběh jeho V-I charakteristiky pro konstantní parciální tlaky jednotlivých reaktantů (všechny 1,0 atm)	54
6.14	Navržená sekvence pulzů a jejich amplitud představující zátěžný proud využitý pro vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC	57
6.15	Průběh provozní teploty PEMFC pro navržený zátěžný proud určený k vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC	58
6.16	Průběh výkonu PEMFC pro navržený zátěžný proud určený k vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC	59
6.17	Průběh napětí PEMFC pro navržený zátěžný proud	60
6.18	Model reforméru implementovaný k modelu PEMFC	62

6.19	Navržená sekvence pulzů a jejich amplitud představující zátěžný proud určený pro vyšetřování tepelných experimentů v rámci dynamického chování PEMFC	62
6.20	Vliv změny tepelné kapacity C_t na průběh provozní teploty PEMFC - tepelné kapacity: 5.000 J·K ⁻¹ , 7.000 J·K ⁻¹ nominální, 10.000 J·K ⁻¹ . . .	63
6.21	Vliv změny tepelné kapacity C_t na průběh výkonu PEMFC - tepelné kapacity: 5.000 J·K ⁻¹ , 7.000 J·K ⁻¹ nominální, 10.000 J·K ⁻¹	64
6.22	Vliv změny tepelného odporu R_t na průběh provozní teploty PEMFC - tepelné odpory: 0,0185 K·W ⁻¹ , 0,0195 K·W ⁻¹ nominální, 0,0205 K·W ⁻¹	65
6.23	Vliv změny tepelného odporu R_t na průběh výkonu PEMFC - tepelné odpory: 0,0185 K·W ⁻¹ , 0,0195 K·W ⁻¹ nominální, 0,0205 K·W ⁻¹	65
6.24	Blokové schéma znázorňující PEMFC, reformér a DC/DC konvertor pracující na 24 V DC sběrnici	66
6.25	Navržená sekvence pulzů a jejich amplitud představující zátěžný proud určených pro vyšetřování dynamického chování neelektrických veličin na PEMFC	67
6.26	Průběh parciálního tlaku vodíku pro navržený zátěžný proud	68
6.27	Vývoj provozní teploty PEMFC pro navržený zátěžný proud určený k vyšetřování dynamického chování neelektrických veličin na PEMFC .	68
6.28	Základní topologie snižujícího DC/DC konvertoru (modifikováno z [59])	69
6.29	Průběh výstupního napětí snižujícího DC/DC konvertoru	71
6.30	Průběh výstupního proudu snižujícího DC/DC konvertoru	71
7.1	Schématické znázornění energetických pásů P-N přechodu tvořeného chemicky stejnými materiály	73
7.2	Jednodiodové ekvivalentní elektrické schéma fotovoltaického článku respektující vliv sériového R_s a paralelního odporu R_{sh}	78
7.3	Porovnání I-V charakteristik reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro provozní teploty 50 °C a 75 °C při intenzitě slunečního záření 1.000 W·m ⁻² (modifikováno z [28])	84
7.4	Porovnání I-V charakteristik reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro různé intenzity slunečního záření při provozní teplotě modulu 25 °C (modifikováno z [28])	85
7.5	P-V charakteristiky simulovaného fotovoltaického modulu pro různé intenzity slunečního záření při provozní teplotě modulu 25 °C (modifikováno z [28])	87
7.6	Celková doba produkce elektrické energie fotovoltaického modulu pracujícího ve spojení s akumulátorovou baterií v jednotlivých měsících (modifikováno z [2])	89
7.7	Celková doba výroby elektrické energie fotovoltaického modulu v jednotlivých měsících při překročení specifických výkonů $P_{pv} > 0,2 \cdot P_{max}$ a $P_{pv} > 0,4 \cdot P_{max}$ (modifikováno z [2])	90
7.8	Celková doba výroby elektrické energie fotovoltaického modulu v jednotlivých měsících při překročení specifických výkonů $P_{pv} > 0,6 \cdot P_{max}$ a $P_{pv} > 0,7 \cdot P_{max}$ (modifikováno z [2])	90
7.9	Vykreslení měřených dat intenzity slunečního záření, okamžitého výkonu článku a zvolená hodnota požadovaného výkonu ze dne 18. března 2008	92
7.10	Celkové množství sluneční energie dopadající na fotovoltaický modul během jednotlivých měsíců (modifikováno z [87])	93

7.11	Porovnání reálných a teoretických průměrných denních množství sluneční energie dopadající na fotovoltaický modul během jednotlivých měsíců (modifikováno z [87])	94
7.12	Zjednodušené schéma fotovoltaického subsystému složeného ze dvou sériově N_{ser} a dvou paralelně N_{par} zapojených modulů (modifikováno z [28])	95
7.13	Porovnání ideální a reálné intenzity slunečního záření G v lokalitě Brno (modifikováno z [28])	96
7.14	Porovnání výkonů fotovoltaického subsystému složeného ze čtyř polykrytalických modulů ($N_{par}=2$ a $N_{ser}=2$) pro ideální a reálné atmosférické podmínky v lokalitě Brno (modifikováno z [28])	97
8.1	Schématické znázornění použitého aerodynamického modelu	99
8.2	Závislost výkonového součinitele C_P na poměru rychlostí před a za lopatkami rotoru větrné turbíny (modifikováno z [3])	102
8.3	Výkonová křivka větrného zdroje energie (modifikováno z [3])	106
8.4	Porovnání výkonových charakteristik reálné a simulované VTE [115] . .	108

Seznam tabulek

4.1	Procentuální zastoupení produktů v plynu při výrobě H_2 pomocí SMR [50]	19
4.2	Procentuální zastoupení produktů v plynu při výrobě H_2 pomocí POX [50]	21
6.1	Používané materiály pro jednotlivé základní komponenty nízkoteplotních PEMFC [65]	32
6.2	Fyzikální parametry dalších typů membrán s různými EW (při $t = 30\text{ }^\circ\text{C}$ a $RH = 100\%$) [66]	33
6.3	Termodynamické potenciály při standardních podmínkách [61, 67]	36
6.4	Ekvivalence mezi chemickým a elektrickým vyjádřením popisující změnu parciálních tlaků jednotlivých reaktantů v PEMFC [76]	42
6.5	Ekvivalence termodynamického a elektrického vyjádření PEMFC [42]	43
6.6	Fyzikální parametry Nafion membrány s $EW = 1.100$ (při $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ a $RH = 50\%$) [66, 74]	46
6.7	Hodnoty parametrů využitých v novém modelu PEMFC	52
6.8	Hodnoty jednotlivých parametrů využitých v novém matematickém modelu PEMFC pro vyšetření dynamického chování	57
6.9	Doplňující parametry PEMFC k provedení tepelných experimentů a hodnoty parametrů využitých pro modely reforméru a regulace tlaků reaktantů	61
7.1	Maximální dosažené účinnosti jednotlivých fotovoltaických článků [94]	76
7.2	Přehled faktorů kvality diody pro jednotlivé typy průmyslově vyráběných fotovoltaických článků [101]	79
7.3	Teplotní koeficienty jednotlivých typů průmyslově vyráběných fotovoltaických modulů [90, 95]	80
7.4	Vstupní parametry použité pro stanovení sériového R_{sr} a paralelního odporu R_{shr} fotovoltaického modulu při standardních testovacích podmínkách	82
7.5	Doplňující vstupní parametry použité pro simulaci fotovoltaického modulu	83
7.6	Porovnání faktorů plnění reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro různé provozní podmínky [28]	86
7.7	Výkonový potenciál fotovoltaického modulu během června a prosince [2]	91
7.8	Doplňující parametry použité pro simulaci fotovoltaického subsystému	96
8.1	Hodnoty drsností povrchů pro jednotlivé typy terénů (modifikováno z [4])	105
8.2	Hodnoty parametrů větrné turbíny [131]	107
8.3	Parametry generátoru a další doplňující parametry použité pro simulaci [115]	108

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
A	aktivní plocha palivového článku	cm^2
A_0	průtočná plocha v oblasti 0	m^2
A_1	průtočná plocha v oblasti 1	m^2
A_2	průtočná plocha v oblasti 2	m^2
A_3	průtočná plocha v oblasti 3	m^2
A_R	plocha opisovaná rotorem větrné turbíny	m^2
A_s	plocha vzorku	cm^2
B	součinitel tlumení	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$
C	kapacita	F
C_P	výkonový součinitel	-
$C_{P,max}$	maximální hodnota výkonového součinitele	-
C_T	součinitel momentu	-
$C_{T,max}$	maximální hodnota součinitele momentu	-
C_b	molární objemová koncentrace reaktantů uvnitř elektrody	$\text{mol}^2\cdot\text{dm}^{-3}$
C_s	molární objemová koncentrace reaktantů na povrchu elektrody	$\text{mol}^2\cdot\text{dm}^{-3}$
C_t	tepelná kapacita palivového článku	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
C_{tn}	nominální tepelná kapacita palivového článku	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
CV	poměr molárního množství vodíku a metanu (konverzní faktor)	-
D	difúzní koeficient	$\text{dm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
D	střída	-
E	energie	J
E	sluneční energie	$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$
E_0	napětí palivového článku při standardních podmínkách	V
E_C	energetická hladina vodivostního pásu	eV
E_{Nernst}	Nernstovo napětí	V
E_V	energetická hladina valenčního pásu	eV
$E_{avg,d}$	průměrné denní množství sluneční energie	$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$
E_f	Fermiho hladina	eV
E_g	šířka zakázaného pásma polovodiče	eV
E_{month}	měsíční množství sluneční energie	$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$
EW	ekvivalentní hmotnost	-
F	Faradayova konstanta	$\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$
F_t	tahová síla	N
FF	faktor plnění	-
FF_r	faktor plnění reálného fotovoltaického modulu	-
FF_s	faktor plnění simulovaného fotovoltaického modulu	-
G	intenzita slunečního záření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
G_n	nominální intenzita slunečního záření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
I_0	saturační proud	A
I_{0n}	nominální saturační proud	A
I_{fc}	proud palivové článku	A
I_{fcn}	nominální proud palivové článku	A

Značka	Popis	Jednotka
I_{ph}	fotovoltaický proud	A
I_{phn}	nominální fotovoltaický proud	A
I_{pm}	proud fotovoltaického modulu při maximálním výkonu	A
I_{pv}	proud fotovoltaického článku/modulu	A
I_{pvs}	proud fotovoltaického subsystému	A
I_{sc}	proud nakrátko fotovoltaického modulu	A
I_{scn}	nominální proud nakrátko fotovoltaického panelu	A
IEC	iontová výměnná kapacita	meq·g ⁻¹
J	proudová hustota	mA·cm ⁻²
J	moment setrvačnosti	kg·m ²
J_L	limitní proudová hustota	mA·cm ⁻²
K	konstanta PI regulátoru	-
K_I	teplotní koeficient proudu fotovoltaického modulu	A·K ⁻¹
$K_{I\%}$	procentuální teplotní koeficient proudu nakrátko fotovoltaického článku/modulu	%·K ⁻¹
K_V	teplotní koeficient napětí fotovoltaického modulu	V·K ⁻¹
$K_{V\%}$	procentuální teplotní koeficient napětí naprázdno nakrátko fotovoltaického článku/modulu	%·K ⁻¹
L	indukčnost	H
L_d	podélní indukčnost generátoru	mH
L_q	příčná indukčnost generátoru	mH
N_0	počet palivových článků v sérii	-
N_{par}	počet paralelně spojených fotovoltaických modulů	-
N_s	počet fotovoltaických článků v sérii	-
N_{ser}	počet sériově spojených fotovoltaických modulů	-
P	tlak	Pa
P_R	výkon větrné turbíny	W
P_{fc}	výkon palivového článku	W
P_{fcn}	nominální výkon palivového článku	W
P_{max}	maximální výkon fotovoltaického modulu	W
$P_{max,m}$	matematicky stanovený maximální výkon fotovoltaického modulu	W
P_{pv}	výkon fotovoltaického článku/modulu	W
P_{pvs}	výkon fotovoltaického subsystému	kW
P_{pvsn}	nominální výkon fotovoltaického subsystému	kW
P_s	výstupní elektrický výkon statoru	W
\dot{Q}	tepelné výkonové ztráty palivového článku	W
\dot{Q}_a	tepelné výkonové ztráty do okolí	W
Q_m	hmotnostní průtok vzduchu rotorem větrné turbíny	kg·s ⁻¹
\dot{Q}_s	tepelný výkon uložený v palivovém článku	W
R	molární plynová konstanta	J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
R	odpor	Ω
R	poloměr rotoru větrné turbíny	m
R_L	odpor induktoru	Ω

Značka	Popis	Jednotka
R_T	tepelný odpor	$\text{cm}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_a	odpor vinutí	Ω
R_{act}	odpor aktivačních ztrát palivového článku	Ω
R_{con}	odpor koncentračních ztrát palivového článku	Ω
$R_{electron}$	ekvivalentní odpor pro tok elektronů	Ω
R_{esr}	ekvivalentní sériový odpor kapacitoru	Ω
R_{int}	vnitřní odpor palivového modulu	Ω
R_{proton}	ekvivalentní odpor pro tok protonů	Ω
R_s	sériový odpor fotovoltaického článku/modulu	Ω
R_{sh}	paralelní odpor fotovoltaického článku/modulu	Ω
R_{shr}	paralelní odpor fotovoltaického modulu při STC	Ω
R_{sr}	sériový odpor fotovoltaického modulu při STC	Ω
R_t	absolutní tepelný odpor palivového článku	$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_{tn}	absolutní nominální tepelný odpor palivového článku	$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
RH	relativní vlhkost	%
T	absolutní teplota	K
T	absolutní teplota fotovoltaického článku/modulu	K
T	absolutní teplota palivového článku	K
T_L	teplota dolní desky	K
T_U	teplota horní desky	K
T_0	standardní teplota	K
T_a	teplota okolí	K
T_{em}	elektromagnetický točivý moment	$\text{N}\cdot\text{m}$
T_{ic}	empirický parametr pro výpočet teploty palivového článku	-
T_{it}	empirický parametr pro výpočet teploty palivového článku	-
T_m	mechanický točivý moment	$\text{N}\cdot\text{m}$
T_n	nominální absolutní teplota fotovoltaického článku/modulu	K
T_n	nominální teplota palivového článku	K
T_{rt}	empirický parametr pro výpočet teploty palivového článku	-
T_x	empirický parametr pro výpočet teploty palivového článku	K
U	faktor využití vodíku	-
U_x	faktor využití daného reaktantu	-
V	objem kanálu palivového článku	dm^3
V_D	difúzní napětí	V
V_a	objem anodového kanálu	dm^3
V_{act}	aktivační ztráty palivového článku	V
V_c	objem katodového kanálu	dm^3
V_{con}	koncentrační ztráty palivového článku	V
V_d	výstupní napětí měniče	V
V_{fc}	výstupní napětí palivového článku	V
V_m	molární objem	$\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$
V_{oc}	napětí naprázdno fotovoltaického modulu	V
V_{ocn}	nominální napětí naprázdno fotovoltaického modulu	V

Značka	Popis	Jednotka
V_{ohm}	ohmické ztráty palivového článku	V
V_{pm}	napětí fotovoltaického modulu při maximálním výkonu	V
V_{pv}	napětí fotovoltaického článku/modulu	V
V_{pvs}	napětí fotovoltaického subsystému	V
V_t	tepelné napětí	V
V_{tn}	nominální tepelné napětí	V
W	práce	J
c	rychlost světla	$m \cdot s^{-1}$
c_{O_2}	koncentrace kyslíku na katodovém rozhraní membrána-plyn	$mol \cdot cm^{-3}$
c_{H^+}	koncentrace protonů na katodovém rozhraní membrána-plyn	$mol \cdot cm^{-3}$
c_{H_2}	koncentrace vodíku v kapalně fázi na anodovém rozhraní membrána-plyn	$mol \cdot cm^{-3}$
$c_{H_2O^+}$	koncentrace vody na katodové straně	$mol \cdot cm^{-3}$
dI	změna proudu	A
dT	změna teploty	K
dU	změna napětí	V
di_L	změna proudu induktorem	A
dp_{H_2}	změna parciálního tlaku vodíku	atm
dp_{H_2O}	změna parciálního tlaku vody	atm
dp_{O_2}	změna parciálního tlaku kyslíku	atm
dp_x	změna parciálního tlaku daného reaktantu x	atm
dt	změna času	s
dv_c	změna napětí na kapacitoru	V
e	elektrický náboj	C
f	frekvence	Hz
h	Planckova konstanta	$J \cdot s^{-1}$
h	součinitel přestupu tepla jednoho palivového článku	$W \cdot cm^{-2} \cdot K^{-1}$
h	skutečná nadmořská výška	m
h	výška nad zemským povrchem, ve které je uvažována rychlost \bar{v}	m
h_{ref}	výška nad zemským povrchem, ve které je uvažována rychlost \bar{v}_{ref}	m
i_L	proud induktorem	A
i_{load}	proud zátěže	A
j	proudová hustota	$A \cdot cm^{-2}$
j_0	výměnná proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
k	Boltzmannova konstanta	$J \cdot K^{-1}$
k_a^0	rychlostní konstanta anodové reakce	$cm \cdot s^{-1}$
k_c^0	rychlostní konstanta katodové reakce	$cm \cdot s^{-1}$
k_{H_2}	molární konstanta vodíku	$kmol \cdot atm^{-1} \cdot s^{-1}$
k_{H_2O}	molární konstanta vody	$kmol \cdot atm^{-1} \cdot s^{-1}$
k_{O_2}	molární konstanta kyslíku	$kmol \cdot atm^{-1} \cdot s^{-1}$
k_x	molární konstanta reaktantu x	$kmol \cdot atm^{-1} \cdot s^{-1}$
l	tloušťka polymerové membrány palivového článku	cm
m	hmotnost	kg

Značka	Popis	Jednotka
n	faktor kvality diody	-
n	počet elektronů na reagující iont či molekulu	-
n_x	látkové množství daného reaktantu x	mol
p	celkový tlak uvnitř palivového článku	atm
p	počet pólových dvojic	-
p_0	tlak vzduchu/větru v oblasti 0	Pa
p_1	tlak vzduchu/větru v oblasti 1	Pa
p_2	tlak vzduchu/větru v oblasti 2	Pa
p_3	tlak vzduchu/větru v oblasti 3	Pa
p_{H_2}	parciální tlak vodíku	atm
p_{H_2O}	parciální tlak vody	atm
p_{O_2}	parciální tlak kyslíku	atm
p_{amb}	tlak okolí	atm
p_{ref}	požadovaná hodnota tlaku	atm
p_x	parciální tlak daného reaktantu x	atm
q_{H_2}	molární tok vodíku	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
$q_{H_2}^{in}$	vstupní molární tok vodíku	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
$q_{H_2}^{out}$	výstupní molární tok vodíku	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
$q_{H_2}^r$	reagující molární tok vodíku	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
$q_{H_2}^{req}$	množství molárního toku vodíku pro konkrétní zatížení palivového článku	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
$q_{O_2}^{in}$	vstupní molární tok kyslíku	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
$q_{O_2}^{out}$	výstupní molární tok kyslíku	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
$q_{O_2}^r$	reagující molární tok kyslíku	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
q_{meth}	molární tok metanu	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
q_{meth}^{ref}	referenční molární tok metanu	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
q_x	molární tok daného reaktantu x	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
q_x^{in}	vstupní molární tok daného reaktantu x	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
q_x^{out}	výstupní molární tok daného reaktantu x	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
q_x^r	reagující molární tok daného reaktantu x	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
q_x^{ref}	referenční množství molárního toku daného reaktantu x	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
r_{H-O}	poměr molárních toků vodík-kyslík	-
s	komplexní nezávislá proměnná	-
t	doba	h
t	doba provozu	s
t	teplota	$^{\circ}\text{C}$
t_0	počáteční doba uvažovaného časového intervalu	s
t_1	konečná doba uvažovaného časového intervalu	s
t_a	teplota okolí	$^{\circ}\text{C}$
t_{max}	doba maxima křivky intenzity slunečního záření podle Gaussovy funkce	h
t_n	nominální teplota fotovoltaického článku/modulu	$^{\circ}\text{C}$
t_{op}	provozní teplota fotovoltaického článku/modulu	$^{\circ}\text{C}$
t_{total}	celkový výrobní čas fotovoltaického modulu	h

Značka	Popis	Jednotka
$t_{total,20}$	výrobní čas fotovoltaického modulu pro $P_{pv} > 0,2 \cdot P_{max}$	h
$t_{total,40}$	výrobní čas fotovoltaického modulu pro $P_{pv} > 0,4 \cdot P_{max}$	h
$t_{total,60}$	výrobní čas fotovoltaického modulu pro $P_{pv} > 0,6 \cdot P_{max}$	h
$t_{total,70}$	výrobní čas fotovoltaického modulu pro $P_{pv} > 0,7 \cdot P_{max}$	h
v	rychlost větru	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
\bar{v}	průměrná rychlost větru ve výšce h	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_0	rychlost vzduchu/větru v oblasti 0	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
\bar{v}_{ref}	průměrná rychlost větru výšce h_{ref}	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_{10}	rychlost větru v 10 m nad zemským povrchem	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_1	rychlost vzduchu/větru v oblasti 1	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_2	rychlost vzduchu/větru v oblasti 2	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_3	rychlost vzduchu/větru v oblasti 3	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_R	rychlost vzduchu/větru procházejícího rotorem větrné turbíny	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_c	okamžitá hodnota napětí kapacitoru	V
v_{in}	vstupní napětí konvertoru	V
v_{in}	spouštěcí rychlost větru	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_n	rychlost při jmenovitém výkonu	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_{out}	výstupní napětí konvertoru	V
v_{out}	rychlost větru pro odstavení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$x(s)$	výkon získaný z výkonové křivky pro jednotlivé rychlosti větru	W
$y(s)$	aktuální výstupní výkon větrné turbíny	W
ΔG	změna Gibbsovy volné energie	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔG^0	změna Gibbsovy volné energie při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔG_e	volná aktivační energie chemisorpce na katodě	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔG_{ec}	volná aktivační energie chemisorpce na anodě	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔH	změna entalpie	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta H_{H_2}^0$	změna entalpie vodíku při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta H_{H_2O}^0$	změna entalpie vody při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta H_{O_2}^0$	změna entalpie kyslíku při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔH_i^0	změna entalpie látky i při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
ΔS	změna entropie	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\Delta S_{H_2}^0$	změna entropie vodíku při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\Delta S_{H_2O}^0$	změna entropie vody při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\Delta S_{O_2}^0$	změna entropie kyslíku při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ΔS_i^0	změna entropie látky i při standardních podmínkách	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ΔT	rozdíl teplot (skutečné provozní a nominální)	K
ΔU	změna celkové vnitřní energie	J
ΔV	změna objemu	m^3
Δp	tlaková ztráta na rotoru	Pa
Φ	magnetický tok	Wb
Ψ	polo-empirický parametr představující efektivní obsah vody membrány	-
α	úhel pro stanovení ideálního rozdělení intenzity slunečního záření	°

Značka	Popis	Jednotka
α	koeficient přenosu náboje	-
α	koeficient drsnosti povrchu	-
α_c	koeficient přenosu náboje na katodě	-
β	úhel natočení lopatky větrné turbíny	°
δ	teplotní koeficient sériového odporu fotovoltaického modulu	-
δ	tloušťka difúzní vrstvy	cm
ϵ_{er}	přesnost výpočtu	-
λ	vlnová délka	m
λ	koeficient rychloběžnosti	-
λ_i	pomocná veličina	-
ξ_1	empirický koeficient aktivačních ztrát palivového článku	V
ξ_2	empirický koeficient aktivačních ztrát palivového článku	V·K ⁻¹
ξ_3	empirický koeficient aktivačních ztrát palivového článku	V·K ⁻¹
ξ_4	empirický koeficient aktivačních ztrát palivového článku	V·K ⁻¹
ρ_M	specifická rezistivita membrány pro tok protonů	Ω·cm
$\rho_{M(OC,303)}$	specifická rezistivita membrány pro tok protonů pro palivový článek provozovaný naprázdno s teplotě 303 K	Ω·cm
ρ	hustota vzduchu	kg·m ⁻³
ρ_0	hustota vzduchu v nulové nadmořské výšce	kg·m ⁻³
σ	šířka křivky intenzity slunečního záření ve výšce $G_n \cdot e^{-\frac{1}{8}}$ Gaussovy funkce	h
τ	časová konstanta reforméru PI regulátoru	s
τ_1	časová konstanta reforméru	s
τ_2	časová konstanta reforméru	s
τ_{H_2}	časová konstanta pro vodík	s
τ_{H_2O}	časová konstanta pro vodu	s
τ_{O_2}	časová konstanta pro kyslík	s
τ_x	časová konstanta pro reaktant x	s
ϕ	teplotní koeficient paralelního odporu fotovoltaického modulu	-
ϕ	tok fotonů	J·s ⁻¹
ω	úhlová rychlost rotoru větrné turbíny	rad·s ⁻¹
ω_s	úhlová rychlost magnetického toku generátoru	rad·s ⁻¹

Zkratka	Popis
AFC	palivový článek s alkalickým elektrolytem (Alkaline fuel cell)
AM	hustota vzduchu (Air Mass)
BP	bipolární deska (Bipolar Plate či Gas Flow Bipolar Plate)
C	uhlík
CC	jímač volných elektronů (Current Collector)
CH ₃ OH	metanol
CH ₄	metan
CHP	kombinovaná výroba elektřiny a tepla (Combined Heat and Power)
CIGS	měď indium galium selen (Copper Indium Gallium Selenide)
CIS	měď indium selen (Copper Indium Selenide)
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
CP	chladicí desky palivového článku (Cooling Plate)
CPV	fotovoltaika koncentrovaná (Concentrated Photovoltaics)
CVVOZE	Centrum výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie
CdTe	telurid kademnatý
ČR	Česká republika
DC	stejnsměrný proud (Direct Current)
DFC	palivový článek využívající vnitřní reformaci vodíku (Direct Fuel Cell)
DGM	model prašného plynu (Dusty Gas Model)
DMFC	palivový článek pracující přímo na metanol (Direct metanol Fuel Cell)
DSSC	barvivem senzitivizovaný solární článek (Dye-Sensitized Solar Cell)
E	východ (East)
EFG	metoda tažení pásu polykrystalického křemíku (Edge defined Film - fed Growth)
EP	koncová deska (End Plate)
ESRA	Evropský atlas solárního záření (European Solar Radiation Atlas)
EU	Evropská unie
e ⁻	elektron
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
FPS	system využívající parní reformování pro výrobu vodíku (Fuel Processing System)
FVE	fotovoltaická elektrárna nebo fotovoltaický zdroj energie
FhG-ISE	Fraunhoferský institut pro solární energetické systémy (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems)
GDE	plynová difúzní elektroda (Gas Diffusion Electrode)
GDL	difúzní vrstva palivového článku (Gas Diffusion Layer)
GPS	Globální polohovací systém (Global Positioning System)
GaAs	arsenid galitý
grid-off	system nepřipojený k distribuční síti
grid-on	system připojený k distribuční síti
H ⁺	kationt vodíku
H _{2(g)}	molekula vodíku (plyn)
H _{2O(l)}	voda (kapalina)
H _{3O} ⁺	hydroxoniový iont
H ₂ S	sirovodík

Zkratka	Popis
H ₃ PO ₄	kyselina fosforečná
HAWT	turbína s horizontální osou otáčení (Horizontal Axis Wind Turbine)
HIT	heterogenní spojení s vnitřní tenkou vrstvou (Heterojunction with Intrinsic Thin layer)
HS	hybridní systém
HT-PEMFC	palivový článek s polymerním elektrolytem pracující s vyšší provozní teplotou (High Temperature - Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
I-V	závislost proudu na napětí
JRC	Společné výzkumné centrum Evropské komise (Joint Research Centre)
K	draslík
K ₂ CO ₃	uhličitán draselný
KOH	hydroxid draselný
KRICT	Korejský výzkumný institut chemických technologií (Korean Research Institute of Chemical Technology)
LT-PEMFC	palivový článek s polymerním elektrolytem pracující s nízkou provozní teplotou (Low Temperature - Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
Li	lithium
MAE	membránové elektrodové uspořádání (Membrane Electrode Assembly)
MCFC	palivové články s roztavenými uhličitany (Molten Carbide Fuel Cell)
MPPT	sledování bodu maximálního výkonu (Maximum Power Point Tracking)
MOSFET	typ tranzistoru (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
N	dusík
N	polovodič typu N, kde elektrony jsou majoritní
N	sever (North)
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (National Aeronautics and Space Administration)
NO _x	oxidy dusíku
NOCT	běžná provozní teplota fotovoltaického článku (Normal Operating Cell Temperature)
NREL	Národní laboratoř pro obnovitelnou energii (National Renewable Energy Laboratory)
NdFeB	směs neodymu, železa a boru (National Renewable Energy Laboratory)
NiO	oxid nikelnatý
O ²⁻	aniont kyslíku
O _{2(g)}	molekula kyslíku (plyn)
OPN	oblast prostorového náboje
OZE	obnovitelné zdroje energie
P	polovodič typu P, kde díry jsou majoritní
P-N	přechod či oblast na rozhraní příměsového polovodiče typu P a polovodiče typu N
P-V	závislost činného výkonu na napětí
PAFC	palivové články s elektrolytem s kyselinou fosforečnou (Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEMFC	palivový článek s polymerním elektrolytem (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
PMG	generátor s permanentními magnety (Permanent Magnet Generator)

Zkratka	Popis
POX	parciální oxidace (Partial Oxidation)
PI	proporcionální a integrační části regulátoru (Proportional Integral)
PID	proporcionální, integrační a derivační části regulátoru (Proportional Integral Derivative)
PSA	tlakové adsorpční procesy (Pressure Swing Adsorption)
PTFE	teflon (polytetrafluorethen)
PVGIS	Fotovoltaický geografický informační systém (Photovoltaic Geographical Information System)
PVPP	anglický ekvivalent k FVE (Photovoltaic Power Plant)
PWM	pulsní šířková modulace (Pulse Width Modulation)
Pd	palladium
Pt	platina
SMR	parní reformování (Steam Methane Reforming)
SOFC	palivové články s tuhými oxidy (Solid Oxide Fuel Cell)
STC	standardní testovací podmínky (Standard Test Conditions)
Si	křemík
Stack	palivový modul složený z jednotlivých článků
TAČR	Technologická agentura České republiky
UEEN	Ústav elektroenergetiky
USA	Spojené státy americké (United States of America)
V-I	závislost napětí na proudu
VAWT	turbína s vertikální osou otáčení (Vertical Axis Wind Turbine)
VTE	větrná elektrárna nebo větrný zdroj energie
VUT	Vysoké učení technické v Brně
WPP	anglický ekvivalent k VTE (Wind Power Plant)
Y	yttrium
ZrO ₂	oxid zirkoničitý

1 Úvod

Ve většině zemí je dnes možné sledovat značný průmyslový rozvoj a rychlý růst životní úrovně obyvatelstva. V souvislosti s těmito skutečnostmi dochází k nárůstu spotřeby elektrické energie. Pro pokrytí tohoto navýšení musí být proto zajištěn dostatek energie. Navýšení spotřeby lze dorovnat rozšířením základny výroben elektrické energie nebo zajistit nákupem elektřiny nebo jejím dovozem z okolních zemí. Nedostatek elektrické energie může vést k situaci, kdy bude docházet k častějším výpadkům elektrizačních sítí.

Rozšíření základny výroben je rovněž ovlivněno skutečností, že mnoho zemí přistoupilo k mezinárodním dohodám, které je mimo jiné zavazují ke zvýšení podílu vyrobené elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Oproti minulosti tak v řadě evropských či rozvojově vyspělých zemích dochází k poměrně významné podpoře a značnému rozvoji OZE [1]. K nárůstu jejich instalovaného výkonu, pak dochází zejména díky příznivé legislativě a snížením výrobních nákladů na danou technologii. Legislativa pro tyto zdroje garantuje dotace a někdy i diskutabilní zvýhodnění vůči zdrojům ostatním. Samotná instalace těchto zdrojů může být užitečná pro životní prostředí, což je častým argumentem pro obhájení zmíněného finančního zvýhodnění. Obnovitelné zdroje tak nejsou pouhým prostředkem pro případné rozšíření základny výroben nebo pro plnění závazků zemí vůči mezinárodním dohodám, ale jsou i výhodným podnikatelským záměrem nebo vhodnou alternativou elektrického napájení odlehlých míst.

Jelikož náklady na elektrickou energii jsou přímo úměrné dopravované vzdálenosti a nepřímo úměrné množství dopravované energie, je z tohoto pohledu oprávněná i instalace lokálních zdrojů energie, a to zejména v odlehlých oblastech, ostrovech nebo v některých rozvojových zemích. V těchto zemích může někdy být vhodnější využití decentralizovaných zdrojů energie na místo výstavby konvenčních zdrojů a související infrastruktury [2]. Lokální zdroje energie jsou nejčastěji tvořeny právě obnovitelnými zdroji energie, zdroji spalující biomasu nebo je tvoří hybridní systémy, které slučují spolupráci více principiálně odlišných zdrojů energie. Spolupráce odlišných zdrojů může obecně eliminovat nestability dodávek elektrické energie, které by nastaly například při realizaci systému pouze fotovoltaickým (FVE) nebo větrným (VTE) zdrojem energie [2].

Přestože obnovitelné zdroje či hybridní systémy (HS) nejsou schopny svým výkonem konkurovat konvenční výrobě elektřiny, mohou představovat silný potenciál budoucí energetiky. Například hybridní systémy, založené na kooperaci vodíkových palivových článků a OZE, reprezentují oblast oprávněného zájmu. Význam obnovitelných zdrojů je zřejmý a na vodíkové technologie se pohlíží s velkou nadějí, jelikož technologický stav palivových článků naznačuje, že je tato oblast opět na svém vzestupu. Do jisté míry tomu přispívají i vlastnosti provozu palivových článků, které korespondují s aktuálními ekologickými požadavky. V blízké budoucnosti bude hlavní využití vodíkových

technologií v energetice právě v podobě hybridních systémů či mikro-kogeneračních systémů (CHP) na úrovni rezidencí, a to zejména vzhledem k technickým a ekonomickým aspektům. Samotná kombinace palivových článků a obnovitelných zdrojů může být do budoucna velmi perspektivní.

Systém založený na nepřipojení k distribuční síti by měl plnit roli celodenního autonomního zdroje. Proměnlivost výroby energie z OZE může přímo ovlivnit spolehlivost dodávky elektřiny. Díky variabilitě vstupních veličin systému je opodstatněné při návrhu provádět matematickou simulaci, jelikož princip výroby elektrické energie u jednotlivých zdrojů je odlišný [3]. Simulací lze rychleji a efektivněji ověřit spolehlivost systému jako celku a příznivě tak působit i na ekonomickou část návrhu. Uvedené skutečnosti ukazují legitimní důvod pro provedení simulace hybridního systému, který obsahuje palivový článek a proměnlivé zdroje energie.

2 Současná technologie palivových článků

Kapitola stručně seznámí s významnými historickými milníky ve vývoji palivových článků. Jelikož historie článků je opravdu velmi bohatá, jsou přiblížena pouze fakta, která je možné považovat za nejpodstatnější, a to vzhledem ke koncepci disertační práce. Je také provedena základní klasifikace palivových článků a jsou uvedeny charakteristické parametry a vlastnosti článků, jenž jsou v současnosti používány v energetice. Obecně kapitola nastíní i míru možného uplatnění palivových článků v blízké budoucnosti a informuje o projektech řešící implementaci PEMFC jako primární nebo doplňkový zdroj energie. Vzhledem ke skutečnosti, že autor práce je současně i spoluautorem knihy [4], jsou některé části zmíněné kapitoly doslovně převzaty pro potřeby této práce, zejména pak kapitoly 2, 4 a 6.

2.1 Historie a blízká budoucnost palivových článků

Historie palivového článku, od objevení základního principu, přes prototypy až po dnešní známou konstrukci, je stejně zajímavá, jak tomu bývá i u jiných takto přelomových objevů a zařízení. Lze konstatovat, že objevení hlavní podstaty palivového článku přímo souvisí s objevem a zkoumáním elektrolýzy. Dané problematice se v první polovině 19. století věnovalo několik odborníků, mezi nimi i Humphry Davy, také Christian Friedrich Schönbein, který princip palivového článku představil odborné veřejnosti. Všeobecně je nutné uvést, že literatura zabývající se historií palivových článků se v některých faktech liší [5–7].

Za další mezník v historii článků lze považovat provedení řady experimentů, které uskutečnil v roce 1839 sir William Robert Grove a které prokázaly možnost vyrobit elektrický proud prostřednictvím chemické reakce mezi vodíkem, kyslíkem a platिनovým katalyzátorem. Použití termínu palivový článek je pak často přisuzováno Ludwigu Mondovi a Charlesovi Langerovi. Jmenovaní sestrojili funkční palivové články, které využívaly vzduch a plyn ze spáleného uhlí [5–7].

Na jejich práci navázal i Francis Thomas Bacon, který se začal významněji zabývat samotnou konstrukcí palivových článků a použitými materiály v nich, aby v roce 1959 mohl demonstrovat 5 kW (6 kW [8]) palivový článek. Zhruba ve stejné době i Harry Karl Ihrig zkonstruoval 15 kW palivový článek, který sloužil k pohonu traktoru [5–7].

Ve Spojených státech amerických (USA) poté následovala užší spolupráce mezi průmyslem a Národním úřadem pro letectví a kosmonautiku (NASA). Spolupráce velkou měrou přispěla k vývoji této technologie. Konkrétně došlo k významnému rozvoji článků s polymerním elektrolytem (PEMFC) a s alkalickým elektrolytem (AFC), které byly využívány pro vesmírné programy. Ve stejnou dobu v tehdejší Sovětské svazu byl vývoj článků zaměřen zejména k vojenskému využití a jejich implementaci do ponorek [5–7].

Počátkem sedmdesátých let docházelo k poměrně rychlému rozvoji světových velmocí. Rozvoj byl však v letech 1973 a 1979 zpomalen ropnou krizí. V této době již mezi jednotlivými zeměmi panovalo i určité povědomí o ochraně životního prostředí. Tyto a jiné skutečnosti pak vedly k dalšímu vývoji palivových článků, které se vyznačují relativně vysokou účinností přeměny energie a mají mírnější dopad na životní prostředí. V oblasti malých mobilních zdrojů byl vyvinut článek přímo na metanol (DMFC), který měl pomoci omezit produkci výfukových plynů a částečně řešit problematiku závislosti na ropě. Uvažovalo se, že by palivové články mohly pracovat jako velké stacionární zdroje. S touto myšlenkou byly vyvinuty palivové články s elektrolytem ve formě kyseliny fosforečné (PAFC) či s roztavenými uhličitany (MCFC) [7].

Za nejvýznamnější vývoj v osmdesátých letech lze považovat integraci palivových článků do amerických ponorek, v nichž články plnily funkci tichého zdroje energie pro pohon. Z hlediska energetiky jsou pak významné realizace několika velkých stacionárních zdrojů, jež využívají palivové články typu PAFC, které se hodí pro kombinované výroby elektřiny a tepla. Realizované projekty však vycházely spíše jako ekonomicky nezajímavé [7].

Další vývoj se proto zaměřil na menší stacionární zdroje, které by sloužily například jako záložní zdroje a vycházely i ekonomicky přijatelněji. Tyto skutečnosti vedly v devadesátých letech k vytvoření systémů pracujících s palivovými články typu PEMFC a články s tuhými oxidy (SOFC). V tuto dobu byly tvořeny i první varianty s kogeneračními jednotkami, které měly být použity u rezidencí [7].

Z předešlého textu je zřejmé, že význam uplatnění palivových článků byl a je velmi proměnlivý. V současné době jsou palivové články opět na vzestupu. Významně tomu pomáhají jejich vhodné vlastnosti, které korespondují s aktuálními ekologickými požadavky a s ochranou životního prostředí. Pominou-li se palivové články využívané v automobilovém průmyslu, roste význam hybridních systémů, v nichž články kooperují s jinými obnovitelnými zdroji elektrické energie. Obecně nejsou hybridní systémy schopny svým výkonem konkurovat konvenční výrobě elektřiny, mohou však představovat silný potenciál budoucí energetiky. Samotné hybridní systémy by se mohly více instalovat v odlehlých oblastech, na ostrovech nebo v některých rozvojových zemích. V těchto zemích by mohlo být někdy vhodnější využívat decentralizovaných zdrojů energie místo výstavby konvenčních zdrojů a související infrastruktury [2]. Z historického přehledu a z aktuálního vývojového stavu palivových článků je zřejmé, že jejich role v energetice bude v blízké budoucnosti pouze ve formě doplňkových zdrojů energie. Aktuální průzkum světového průmyslového trhu [9] přináší analýzu jejíž výsledky naznačují, že v následujících letech se očekává silný nárůst stacionárních palivových článků.

2.2 Klasifikace palivových článků

Stejně jako u jiných zařízení, i palivové články se dělí podle svých specifických provozních parametrů, jež jsou přímo závislé na samotné konstrukci článků či souvisejí s elektrochemickými ději, které v nich probíhají. Za základní rozdělení palivových článků je možné považovat například dělení podle použitého elektrolytu, způsobu provozování, podle tlaku, výkonu, provozní teploty nebo použitého paliva.

Na základě provozních teplot pracujícího článku jsou články považovány za nízko-templotní, nepřesáhne-li jejich teplota hodnotu 200 °C. Za střednětemplotní články jsou považovány ty, u kterých je provozní teplota v rozmezí od 200 °C do 600 °C. U teplot nad 600 °C se pak hovoří o vysokotepelných palivových člancích. Obdobné rozdělení je možné provést i na základě provozních tlaků. Jedná se o palivové články nízkotlaké (do 0,5 MPa), středotlaké (od 0,5 MPa do 1 MPa) a vysokotlaké (nad 1 MPa) [10].

Díky rozmanitosti vlastností jednotlivých typů palivových článků, bude mít i každý typ své specifické využití. V praxi lze proto obecně rozdělit články do čtyř kategorií, a to na přenosné, mobilní, speciální a stacionární. Z pohledu energetiky mají největší význam zdroje stacionární, které zpravidla využívají palivových článků typu SOFC, MCFC, PEMFC nebo také PAFC. Výkonový rozsah na jeden článek pak může dosahovat až stovky kW, kdy články dále tvoří stacionární energetický systém o výkonu i několika MW [4]. Systémy o celkovém výkonu několika kW jsou pak nejčastěji koncipovány jako zdroj energie pro zajištění dodávek elektřiny a tepla do komplexních systémů (rodinné domy) či jako záložní zdroje využívající odpadní teplo vznikající provozem článku. V kombinaci s kogenerační jednotkou jsou poměrně často nasazovány v Japonsku a v Jižní Korei. Výkonově významnější systémy (až stovky kW) se využívají pro větší celky (velké budovy, nemocnice, skládky, čističky) [11].

Palivové články lze samozřejmě rozdělit i podle paliva, které je použito pro jejich správnou funkci. Jedná se pak o články na palivo vodíkové, hydrazinové, uhlovodíkové, alkoholové, biochemické, na zemní plyn, uhelný plyn, amoniakové, biochemické a další [10]. Pro stacionární zdroje bývá zpravidla hlavním palivem zemní plyn, který je reformovaný na využitelný vodík. V souvislosti s tím jsou v kapitole 4 uvedeny jednotlivé principy výroby vodíku a možnosti jeho následného uskladnění.

Pro představu jsou uvedeny obecné charakteristiky palivových článků stacionárních zdrojů rozdělených dle použitého elektrolytu. Principiální schéma článku typu PEMFC, chemické procesy probíhající na jednotlivých elektrodách nebo jeho matematický popis jsou podrobně objasněny v kapitole 6. Schémata a chemické reakce dalších typů článků jsou pak uvedeny například v [4]. Literatura zmiňuje také informace o AFC a DMFC, jež však pro potřeby energetiky nejsou uvažovány.

2.2.1 Palivový článek s polymerním elektrolytem

V současnosti je jejich vývoj zaměřen na aplikace v řádech jednotek kW. Samotný článek je klasifikován jako nízkoteplotní. Obecně se jedná o palivový článek, který jako elektrolyt využívá pevnou polymerní iontoměničovou membránu. Článek může pracovat s různými provozními teplotami. Rozsah provozních teplot článku může být až do 200 °C. Palivové články nacházejí uplatnění především jako záložní zdroje elektrické energie nebo jsou kombinovány s malými kogeneračními jednotkami například u hotelů či bazénů, kde je zaručen celoroční odběr tepla. Existují a připravují se i projekty, kde jsou články využity přímo jako primární zdroj elektrické energie [4].

Palivové články, které dosahují provozních teplot do 100 °C, se označují jako LT-PEMFC. Tyto články jsou založeny na vodní bázi a využívají membránu, která je tvořena sulfovanými fluoropolymery. Při provozu musí být membrána hydratována, aby byla zajištěna její vodivost. Články se vyznačují vysokou proudovou hustotou, vysokým měrným výkonem vztaheným na jednotku objemu palivového článku, dobrou regulovatelností výkonu a možností uskutečnit studený start. Na druhou stranu potřebují pro svůj provoz velmi čisté palivo a díky nízkým provozním teplotám nejsou úplně vhodné pro spojení s kogenerační jednotkou [12, 13]. Kapitola 3 ovšem představuje i toto využití palivových článků.

Zmíněný problém částečně řeší druhý typ tohoto článku, který je založen na bázi minerálních kyselin. Membrány jsou například složeny z benzimidazolových heterocyklických sloučenin. Tyto články jsou označovány jako HT-PEMFC a dosahují provozních teplot až 200 °C. Článek je tak vhodnější pro spolupráci s kogenerační jednotkou malých výkonů. U tohoto typu se dosahuje nižší proudové hustoty, horší regulovatelnosti výkonu a nelze provést studený start [12, 13].

2.2.2 Palivové články s elektrolytem s kyselinou fosforečnou

Jedná se o palivové články, kde je elektrolyt tvořen kyselinou fosforečnou H_3PO_4 . Principiální schéma palivového článku typu PAFC je shodné se schématem typu PEMFC. Zmíněná koncepce by byla vhodná pro realizaci středních stacionárních zdrojů energie (stovky kW). Díky své nízké provozní teplotě se tyto články řadí mezi nízkoteplotní palivové články [12, 14].

U tohoto typu článku jsou kladeny zvýšené požadavky na jeho konstrukci, rovněž na použité materiály, protože koncentrace použité kyseliny fosforečné může dosahovat až 100 %. Výhodami článku jsou vyšší odolnost proti působení oxidu uhličitého, podobně jako má PEMFC na bázi minerálních kyselin. Díky této vlastnosti nemusí být použito čistého paliva a napájení může být řešeno prostřednictvím reformace fosilních paliv. Provozní teploty se pohybují kolem 200 °C a články jsou tak vhodné i pro výrobu tepla a pro instalaci s kogeneračními jednotkami. Spojení kombinované výroby energie je v tomto případě na místě, poněvadž se články vyznačují nižší účinností výroby

elektrické energie oproti ostatním typům. Při kombinované výrobě se však účinnost pohybuje i více než přes 80 %. Konkrétní uplatnění článků je pak ve větších budovách, kde je potřeba zajistit kontinuální odběr vzniklého tepla. Jedná se například o hotely, nemocnice či pracovní haly a další [12, 14].

V současnosti je většina společností zaměřena na výrobu či vývoj elektráren využívajících předešlé typy článků. Palivové články využívající kyselinu fosforečnou jsou instalovány častěji na americkém kontinentě. Nabízená řešení jsou obdobná jako pro jiné typy článků a přináší také komplexní řešení, jež ukazuje směr, kterým se stacionární zdroje s palivovými články vydaly [4].

2.2.3 Palivové články s roztavenými uhličitany

Jako elektrolyt u těchto článků se využívá roztavených karbidů lithia Li a draslíku K. Jde o prvního zástupce vysokoteplotních článků, kde vysoká teplota zajišťuje potřebné vlastnosti elektrolytu pro správnou funkci článku. V praxi se instaluje výhradně jako stacionární zdroj s výkonem v řádu MW. Při výrobě elektrické energie dosahují články účinnosti až 60 %. U kombinované výroby elektřiny a tepla je účinnost ještě vyšší [12, 14].

Běžná provozní teplota se pohybuje kolem 650 °C. Zmíněná vysoká teplota přisuzuje tomuto typu článků řadu výhod, zejména zlepšení reakční kinetiky. Není proto nutné hledat katalyzátor z ušlechtilých kovů. Stejně tak není nutností využívat čisté palivo, jelikož je článek poměrně imunní vůči otravě oxidem uhličitým a vysoké teploty umožňují přímé vnitřní reformování. Vodík se sám separuje z metanu CH_4 přímo na elektrodě článku, tj. procesy reformování probíhají přímo v palivovém článku. Lze například využít přímo jako palivo i zemní či uhelný plyn. Na druhou stranu však potřeba dosáhnout vysokých provozních teplot znemožňuje rozběh za studena a zhoršuje rychlost výkonové regulovatelnosti článku. To je dáno faktem, že v článku musí kromě chemických reakcí probíhat ještě reakce reformování. Vysoká teplota taky zcela jistě negativně působí na použité materiály, kdy dochází k jejich rychlejší korozi a degradaci. Výčet výhod a nevýhod jednoznačně napovídá, že jsou tyto články vhodné pro velké stacionární zdroje, které by mohly fungovat kontinuálně bez větší potřeby na změnu výkonu [12, 14].

Vlastnosti těchto palivových článků předurčují jejich využití jako kombinovaného zdroje elektřiny a tepla pro nemocnice, univerzity, čističky či výrobní podniky. Tyto systémy pak dosahují velmi dobrých celkových účinností, které se mohou pohybovat i mezi 80 % až 90 % [4].

2.2.4 Palivové články s tuhými oxidy

SOFC představuje další vysokoteplotní palivový článek, kde je elektrolyt v podobě tuhého keramického materiálu (konkrétně Zr_2O dopovaný Y). Tento typ článku na-

chází uplatnění také díky skutečnosti, že byl od počátku vyvíjen ve dvou, respektive třech konstrukčních variantách (jako planární, koplanární a tubulární). Existují malé systémy (nabíječky, jednotky W), rezidenční systémy s kogenerační jednotkou (desítky kW) nebo i velké stacionární zdroje (jednotky MW). Účinnost palivového článku je obdobná jako u předešlého vysokoteplotního typu MCFC [12, 14]. Využití elektrolytu v pevném skupenství usnadňuje návrh a konstrukci samotného palivového článku. Při konstrukci je však nutno respektovat potřebu použití vhodných materiálů. Materiál by měl mít stále pevnostní vlastnosti i během vysokých teplot. Dále by měl být dobrým teplotním izolantem, aby nedocházelo k tepelným ztrátám. Systémy o velkých výkonech tak mohou díky těmto požadavkům dosahovat nemalých rozměrů. Na druhou stranu vysoké provozní teploty (vnitřní reformování) umožní použít různá uhlovodíková paliva. Na rozdíl od MCFC jsou tyto palivové články odolnější i vůči malému množství síry, které se vyskytuje v použitém palivu (například zemní plyn, uhelný plyn). Provozní teploty se pohybují v rozmezí od 800 °C do 1000 °C, články jsou proto vhodnější pro provoz, který nevyžaduje rychlé a velké změny generovaného výkonu [12, 14].

Aktuální nasazování těchto zdrojů ve světě ukazuje, že hlavní úlohu ve velkých stacionárních zdrojích budou mít články typu MCFC. Existuje několik projektů na vybudování výkonově velké elektrárny typu SOFC. To, jestli budou tyto projekty skutečně realizovány, ukáže až čas. V současnosti jsou jednotky instalovány výhradně jako modulární jednotky s výkonem od jednotek kW až stovek kW [4].

2.3 Současný stav využití PEMFC

V rámci kategorie stacionárních palivových článků existují nebo se připravují PEMFC řešení, kdy jsou články využity přímo jako primární zdroj elektrické energie nebo pracují jako doplňkový zdroj energie, který funguje jako součást hybridního systému nebo se kombinuje s kogeneračními jednotkami.

2.3.1 PEMFC jako primární zdroj

Podle [15] má společnost Ballard připraven projekt s označením CLEARgenTM, který představuje elektrárnu jako modulární řešení (jednotky po 500 kW) s protonovou membránou. Elektrická účinnost se pohybuje kolem 50 %. Elektrárna je provozována jako špičkový zdroj energie. Může také pracovat jako nepřetržitý zdroj energie, případně může sloužit ke generování elektřiny, ale i tepla (tepelný výkon 1.100 kW). Palivo může být použito z reformovaného obnovitelného bioplynu produkovaného skládkami komunálního odpadu nebo lze využít vodík, který vzniká jako vedlejší produkt při chemické výrobě. Jednou z nespočetných výhod tohoto 1 MW modulárního uspořádání je zejména jeho rozměr. Elektrické a neelektrické parametry modulární jednotky jsou uvedeny v [15].

U realizovaných projektů například společnost Solvay investovala ve městě Lillo v Belgii více než 5 mil. euro na výstavbu 1 MW systému, který využívá palivové články typu PEMFC firmy Nedstack. Elektrárna se skládá z 12.600 palivových článků. Jedná se o výkonově největší elektrárnu využívající polymerní membránu. Vzhledem k tomu, že v nedaleké blízkosti elektrárny se vyskytuje chemický závod, který při provozu produkuje odpadní vodík, tento se použije jako palivo pro elektrárnu. Výstavbou a provozem elektrárny má být demonstrována i ekonomická výhodnost projektu. V souvislosti s aktuálním provozem je uváděna 50% elektrická účinnost elektrárny, respektive 80% při uvažování rekuperace tepla [16, 17].

2.3.2 PEMFC jako doplňkový zdroj

V rámci kategorie stacionárních palivových článků však vznikají i technická řešení hybridních systémů, kdy PEMFC spolupracují s dalšími zdroji energie a bývají uplatňovány především jako záložní zdroje elektrické energie nebo jsou kombinovány s malými kogeneračními jednotkami. Technické náležitosti jednotlivých PEMFC konceptů jsou blíže představeny v kapitole 3. Tyto systémy jsou pak vhodné u komplexů budov či nebytových prostor, u kterých je obecně zaručen celoroční odběr tepla.

Velké Británie využije například 10 kW palivového článku typu PEMFC, který v rámci hybridního systému slouží k výrobě jak elektrické, tak i tepelné energie, které je dále využito pro ohřev užitkové vody. Hybridní systém slouží k napájení rezidence a je provozován jako grid-on. Skládá se z větrného zdroje 750 kW, elektrolyzéro 30 kW, zásobníků vodíku a geotermálního zdroje energie [18].

Publikace [19, 20] informují, že například v Japonsku bylo na úrovni residentních aplikací instalováno více než dva tisíce mikrokogeneračních systémů využívajících PEMFC. Palivové články jsou také značně instalovány v Jižní Korei [9, 21]. Aktuálně největším evropským projektem v oblasti využití PEMFC, respektive i SOFC v rámci mikrokogeneračních jednotek je "Callux field trial", který spadá pod "National Innovation Programme for Hydrogen" ve Spolkové republice Německo [20]. Obdobné aplikace jsou instalovány i v dalších evropských zemích. Příkladem je dánský projekt "Danish Micro Combined Heat and Power project", kdy jsou instalovány systémy na úrovni veřejných a komerčních objektů [20]. Naproti tomu, palivové články s tuhými oxidy jsou schopny produkovat velké množství tepelné energie, a to díky vysoké provozní teplotě. Jsou proto mnohem vhodnější pro velké průmyslové kogenerační jednotky, kdy je zaručen větší odběr a spotřeba tepelné energie, respektive elektrické energie [19].

V Německu vznikají i projekty, které dle [22] uvažují využít poměrně silné základny větrných elektráren pro výrobu vodíku v elektrolyzérech. Vodík by sloužil jako palivo pro články typu PEMFC. Projekt bude realizován ve městě Herten. Dle navrhované koncepce se využije modulárního řešení jednotlivých subsystémů, tj. elektrolyzéro typu

HySTAT™ 30 a palivového článku typu HyPM™ s elektrickým výkonem 50 kW. Hlavním smyslem projektu je vytvořit zdroj, který by částečně řešil nestabilitu dodávky výkonu z větrných a fotovoltaických elektráren [22]. Nové projekty jsou i přímou reakcí na havárii jaderné elektrárny v Japonsku, která přispěla k rozhodnutí, že Německo v blízké budoucnosti omezí provoz svých jaderných elektráren. Nutno však podotknout, že se nové projekty nebudou moci výkonově srovnávat s výkony jaderných elektráren.

Resumé

Kapitola představuje praktické uplatnění palivových článků v energetice a nastínila jejich budoucí využití. Uvedené skutečnosti jednoznačně poukazují na oprávněnost blíže se zabývat studiem a výzkumem článků typu PEMFC. Problematika řešená v této kapitole je autorem publikována v knize [4].

3 Hybridní systémy a současný stav

Kapitola přináší přehled jednotlivých provozovaných nebo modelovaných konceptů hybridních systémů v energetice. Podrobněji se věnuje zejména konceptům, které obsahují PEMFC a spolupracují s obnovitelnými zdroji elektrické energie. Na jednotlivých konceptech PEMFC hybridních systémů je poukázáno na hlavní nedostatky těchto systémů jako celku, respektive jsou specifikovány nedokonalosti zvolených přístupů matematického modelování PEMFC subsystémů. Obsah této kapitoly byl autorem práce publikován v [3], a to formou krátkého review provozovaných energetických systémů obsahující PEMFC.

3.1 Koncept hybridního systému

Hybridní systém představuje energetický blok (systém), který se skládá z jednotlivých zdrojů energie (subsystém) a který může nebo nemusí být připojený přímo k distribučním sítím. Hybridní systém obsahuje ovšem i další zařízení (subsystém), která jsou nezbytná pro spolehlivý provoz uvažovaného systému jako celku. U hybridních systémů často dochází ke kombinaci spolupráce několika zdrojů energie, které pracují na různých fyzikálních principech, proto ve světě existuje řada různých koncepcí. Jednotlivé koncepty systémů nabízejí i řešení, kdy zdrojem energie není pouze zdroj elektrické energie, ale i zdroje produkující energii tepelnou. Zdroje mohou pracovat například v rámci kogenerační jednotky [23]. Nejčastější koncept je založen výhradně na kooperaci olovených baterií s obnovitelnými zdroji energie, zejména zdroji fotovoltaickými a větrnými [24–27]. Samotná implementace jednotlivých zdrojů a dalších nezbytných zařízení se nepochybně odvíjí od konkrétního požadavku na provoz hybridního systému. Vzhledem k tomu, že se práce zabývá parciálním řešením hybridních systémů, které řeší spolupráci PEMFC a OZE, jsou detailní analýze podrobeny právě tyto koncepty. Jednotlivé koncepty umožní specifikovat nedostatky PEMFC modelů, které by posloužily pro následný návrh nového matematického modelu PEMFC.

3.1.1 Provozované hybridní systémy

Předchozí text informoval o skutečnosti, že palivové články mohou v rámci hybridního systému spolupracovat s obnovitelnými zdroji energie. V některých zemích jsou realizovány hybridní systémy, které využívají LT-PEMFC (dále jen PEMFC) [21, 26, 28, 29]. Systémy mohou být připojené k distribuční síti (grid-on) a mohou pracovat jako primární či rezervní zdroje energie pro domy, rezidence a jiné. Mohou být také provozovány jako autonomní zdroje, bez připojení k síti (grid-off) a nacházet uplatnění v odlehlých lokalitách nebo na ostrovech. Autonomní zdroje mohou fungovat jako systémy s celodenním nebo částečným provozem. Z toho důvodu jsou i koncepty těchto provozovaných systémů řešeny technicky jinak a navzájem se odlišují.

Jelikož se obecně obnovitelné zdroje energie vyznačují svojí proměnlivostí dodávaného výkonu, bývají hybridní systémy z těchto zdrojů doplněny například o elektrolyzéry. Přebytky energie z fotovoltaických či větrných zdrojů jsou využity právě v elektrolyzerech, které vyrábějí vodík pro palivové články a které jsou představeny v [21,30–32]. Samozřejmě, že hybridní systém nemusí vždy obsahovat elektrolyzéry a přebytky mohou být využity odlišným způsobem. Dle [33] jsou v menším množství provozovány i koncepty systémů, kde dochází ke spolupráci OZE a PEMFC s dieselgenerátorem a bateriemi. Pro změnu v [34] jsou představeny stacionární koncepty, které slučující pouze palivové články a baterie. Dále mohou být PEMFC provozovány paralelně s ultrakapacitory. Tato zařízení jsou konstrukčně podobná bateriím [30,31]. Konkrétně [32] ukazuje spojení PEMFC a ultrakapacitoru, jež pracují v rámci samostatné rezidenční aplikace. Kombinace zdrojů má pak docílit lepšího využití paliva pro PEMFC, prodloužit jeho životnost a zlepšit energetickou účinnost. Každopádně je na místě dodat, že systémy mohou plnit i roli celodenního zdroje energie. Konceptem v [31] je řešeno uplatnění energetických přebytků z větrného zdroje energie v elektrolyzérovi, nepřimo právě v nové topologii, kdy je spojen palivový článek a ultrakapacitor. Prezentovaná hybridní topologie vykazuje dobré výkonové možnosti, a to v souvislosti s uvažovanou variabilitou rychlosti větru a modelovaného výkonového zatížení. Navrhovaný systém, který je závislý na proměnlivém zdroji, lze použít v odlehlých izolovaných systémech nebo u izolovaných kogeneračních systémů.

PEMFC mohou najít uplatnění v rámci kogenerační jednotky, kdy navíc i kogenerační jednotka může pracovat v rámci hybridního systému. Na úspěšnou implementaci kogeneračních jednotek s PEMFC do praxe poukazuje podkapitola 2.3. Zpravidla v těchto případech jsou nejpoužívanějšími typy PEMFC a články s tuhými oxidy [35]. PEMFC jsou obvykle využity v mikro-kogeneračních jednotkách, kdy se jejich provozní teplota pohybuje až do 80 °C a kdy je vyprodukovaná tepelná energie dále využita přímo pro ohřev vody v domech a rezidencích. Hlavním palivem bývá zpravidla zemní plyn, který je reformovaný na využitelný vodík. Systémy o výkonu několika kW jsou koncipovány jako zdroj energie pro zajištění dodávek elektřiny a tepla do komplexních systémů (rodinné domy), které zaručují celoroční odběr tepla, nebo jako zdroje záložní využívající odpadní teplo vznikající provozem článku.

3.2 Simulace PEMFC hybridních systémů a jejich nedostatky

Označení PEMFC hybridní systém bude, pro přehlednou interpretaci v dalším textu práce, odpovídat hybridnímu systému s PEMFC. Obsahuje-li PEMFC hybridní systém jakýkoliv obnovitelný zdroj energie, je vhodné znát atmosférické podmínky v místě instalace systému. Jelikož proměnlivost výroby z OZE může přímo ovlivnit spolehlivost dodávky elektřiny, měl by být znám vývoj atmosférických podmínek nebo jejich částečná predikce. Z technického pohledu je nezbytné znát zejména výkonové možnosti

použitého zdroje, a to z důvodu zajištění spolehlivosti provozu hybridního systému.

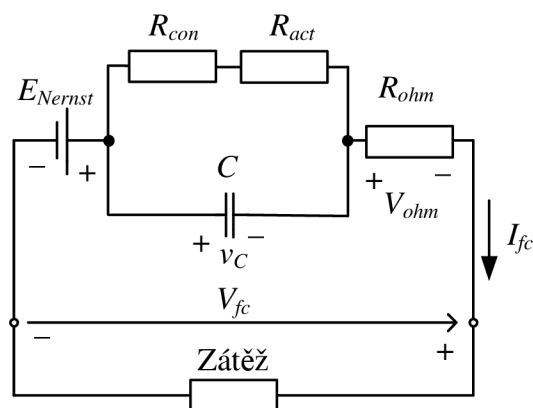
Prostřednictvím matematické simulace je možné věrohodně ověřit spolehlivost systému a případně i eliminovat jeho nevhodnou výkonovou parametrizaci. Správně provedená simulace může příznivě působit i na ekonomickou část návrhu. Navíc lze efektivněji analyzovat provoz systému a jeho spolehlivost při náhlých změnách dodávek elektrické energie u uvažovaných zdrojů energie (subsystémů). Není-li například fotovoltaický subsystém schopen vyrábět energii, je zátěž napájena z větrného subsystému, PEMFC a baterií. To vše samozřejmě záleží na zvoleném konceptu hybridního systému. Všeobecně jsou ale baterie využívány k vykrývání rychlých změn výkonu, protože se vyznačují lepší dynamikou než PEMFC [36], a jsou proto aplikovány na pomalejší změny. Každý systém má svůj navržený algoritmus řízení, jenž rozhoduje o tom, který zdroj bude v danou chvíli pracovat. Základní kostra každého řídicího algoritmu je ovšem stejná. Jedinečnost algoritmu pak vychází z konkrétní koncepce hybridního systému či z výkonových možností použitých subsystémů. Řídicí algoritmus musí každopádně zajistit funkčnost a spolehlivost systémů, a to i v dlouhodobém horizontu.

Již simulace samotného PEMFC představuje značně rozsáhlou problematiku, která zasahuje napříč několika obory, což jednoznačně potvrzuje i existence rozmanitých technických přístupů a řešení. Jednotlivé modely vykazují vzájemné difference ve smyslu odlišného respektování konkrétních fyzikálních a chemických závislostí. Modely mohou zavádět i další různé zjednodušující předpoklady. Všechny přístupy závisí na dostupných vstupních parametrech pro matematický model, ale závisí i na tom jaké výstupní parametry jsou od modelu očekávány a požadovány. Tím je ovlivněn již samotný přístup k matematické definici modelu při zachování dostatečné přesnosti získaných výsledků. Pro PEMFC hybridní systém jsou dle [26] častými simulačními nástroji Hydrogems, Simulink, Hysis nebo bezplatný nástroj HOGA. Přesto současné modely trpí některými nedostatky, a to jak na úrovni subsystémů, tak i na úrovni systému.

3.2.1 Nedokonalosti modelů PEMFC a PEMFC hybridních systémů

Matematické modelování samotného PEMFC lze realizovat pomocí statického modelu, jak ukazuje například [37], kde jsou některé veličiny definovány jako konstantní. Přitom statické modelování simuluje pouze jeden konkrétní ustálený stav PEMFC. Statické modely tak vytvoří základní představu, jakých hodnot mohou dosahovat určité elektrické a neelektrické veličiny, a to třeba při jmenovitém provozu PEMFC nebo během nestandardních podmínek. Pro komplexnější využití výsledků simulací je však nezbytné realizovat výpočty pomocí modelu, který řeší dynamické chování PEMFC. V současnosti existuje řada přístupů dynamického modelování PEMFC, které respektují změny časově závislých veličin, jako například provozní teplotu, jednotlivé parciální tlaky, vnitřní odpor, napěťové ztráty, životnost a další. Nelze ovšem konstatovat, že by jednotlivé přístupy uvažovaly všechny tyto veličiny současně. Naopak některé z nich jsou uvažovány jako neměnné v čase.

Jedním s možných přístupů jako modelovat dynamiku PEMFC je definování elektrického ekvivalentního obvodu, který by odpovídal probíhajícím procesům v článku [38, 39]. Ekvivalentní obvod charakterizující dynamiku PEMFC naznačuje Obr. 3.1 [39]. Dynamika PEMFC je ovlivněna procesy, které se vyskytují na rozhraní mezi elektrodou a membránou. Zejména pak procesy u katody, kde se vyskytuje vysoký přenosový náboj [40]. Významnost dynamického děje je pak závislá na velikosti dynamického napětí ekvivalentní kapacity obvodu C , která je zapojena paralelně s odporem reprezentující aktivační ztráty, respektive na velikosti časové konstanty obvodu [39]. Popis zdokonaleného matematického modelu PEMFC je uveden v kapitole 6.



Obr. 3.1: Ekvivalentní elektrický obvod charakterizující dynamiku palivového článku (modifikováno z [39])

V odborné literatuře [30] je dynamika PEMFC také modelovaná pomocí ekvivalentního obvodu. Aktivační ztráty, teplota nebo vnitřní odpor palivového článku jsou realizovány pomocí empiricky stanovených vztahů. Také v [21] jsou aktivační ztráty modelovány pomocí náhradního obvodu. Je zde uveden i přehled grafických průběhů konkrétních statických stavů PEMFC. Konkrétně závislosti proudu článku na napětí pro jeho různé provozní teploty, případně i velikost tlaku vodíku. Dynamické změny parciálního tlaku a napětí článku jsou modelovány pomocí diferenciálních rovnic prvního řádu. Aktivační ztráty a hodnota vnitřního odporu je stanovena na základě empiricky určených vztahů. Stejně tak je tomu například i u elektrolyzéry, který je popsán pomocí empiricky určeného vztahu. Odborný článek obsahuje i obecné vyjádření jednotlivých koeficientů pro výpočet aktivačních ztrát palivového článku [41]. Pokud bude model postaven výhradně na empiricky stanovených vztazích, problém může nastat s aplikovatelností získaných rovnic na další typy článků, než pro které byly původně verifikovány. Další nedostatečně řešenou problematikou je vyprodukovaná tepelná energie pomocí PEMFC. Ani dříve zmíněný koncept v [31] neřešil otázku vyprodukované tepelné energie a provozní teplota PEMFC byla uvažována konstantní. Řada publikovaných přístupů také uvažuje provozní tlak PEMFC za konstantní. Problematika

nelineární regulace anodového a katodového tlaku PEMFC je řešena například v [41], kdy se pro vysoce nelineární chemické procesy využije přesné linearizace. Při náhlých změnách zatížení PEMFC jsou tak jednotlivé tlaky na straně anody a katody řízeny více komplexněji, a to prostřednictvím parciálních tlaků, tedy pomocí vstupních toků a zátěžného proudu. Tímto řízením lze dosáhnout lepší životnosti článku, když je minimalizován membránový tlakový rozdíl mezi anodou a katodou. Prodloužení životnosti a zlepšení energetické účinnosti krátce a teoreticky řeší [32], bez konkretizace či vyčíslení. Nejsou zde uvedeny ani výsledky simulace pro krátké významné výkonové změny u PEMFC hybridního systému. Dle prezentovaných výsledků je však tento systém dobře přizpůsobivý požadavkům na výkonové změny.

Problematický může být dále i fakt, že současné simulované PEMFC hybridní systémy jsou analyzovány pro značně odlišné časové horizonty. Byla provedena simulace s vyšetřovaným intervalem čtyři měsíce [36]. Jiná studie přináší obdobnou koncepci systému, avšak uvádí vyhodnocení pouze pro jeden den v letním a zimním období [42]. V odborné publikaci [33] je představena spolupráce PEMFC a obnovitelných zdrojů energie s dieselgenerátorem, bateriemi, elektrolyzérem a akumulací vodíku, které pracují v rámci grid-off systému. Publikace se nezabývá konkrétním technickým energetickým řešením, nýbrž jen představuje optimalizovaný návrh provozu a výsledky ekonomiky jejich provozu pro dvě specifická celodenní zatížení. Obě celodenní varianty potvrzují skutečnost, že míra ekonomické výhodnosti je velmi závislá na vstupní investici a provozu palivového článku, respektive malé účinnosti produkce vodíku pomocí elektrolyzéru. Studie obecně poukazují na nutnost provést analýzu systému jako celku více komplexněji. V simulaci by měly být zahrnuty jednak subsystémové výpadky, ale také další skutečnosti, které vycházejí z povahy jednotlivých zdrojů energie. Reálný provoz PEMFC zahrnuje ovšem jiné děje, které se uplatňují až po delší době. Jedná se například o pokles napětí vlivem kondenzace paliva u anody, čímž dochází k omezení přírodních kanálů paliva a významně je tím narušena dynamika palivového článku. V návaznosti na uvedené skutečnosti je nezbytné se zabývat i řídicím systémem hybridního systému. Například v [43] je představena implementace stabilního kontrolního řízení pro hybridní systém. Z pohledu kontinuity dodávky elektrické energie při různých stavech jednotlivých zdrojů elektrické energie vykazuje řídicí systém dobrou spolehlivost. Řídicí systém vychází ze stavu nabití baterií a palivový článek je uváděn do provozu, pokud je výkon zátěže vyšší jak výkon ostatních zdrojů energie. Na druhou stranu ale systém neuvažuje studený start palivového článku a není dále optimalizován provoz článku. Proto by měl být zejména u PEMFC hybridního systému kladen větší důraz na samotný řídicí systém. Pomocí optimálního nastavení řídicího systému lze lépe respektovat životnost některých komponentů palivového článku. Ukazuje se, že hlavním rozhodovacím kritériem současných řídicích algoritmů je stav nabití baterií a není brán v úvahu fakt, že životnost palivového článku je oproti ostatním subsystémům nižší. Kapacita baterií bývá navíc stanovena rozdílnými způsoby a v někte-

rých případech se použití palivového článku jeví jako zbytečné vzhledem k pořizovacím nákladům. Lze konstatovat, že existuje řada nedostatků, kterými disponují modely PEMFC. V kapitole 6 je proto detailně řešena problematika matematického popisu PEMFC. V návaznosti na konkretizovaný popis nedostatků je navržen a analyzován nový model PEMFC, jež tyto nedostatky eliminuje.

Existují také aplikace, kde jsou palivové články začleněny do mikrokogeneračních jednotek [35]. Z přehledu je zřejmé, že v současnosti je provozována nebo testována řada systémů, kde palivové články kooperují s obnovitelnými zdroji energie (fotovoltaický zdroj, větrný zdroj aj.) [26]. Dle [21] je uvažován i systém složený z PEMFC, větrného zdroje energie a regulátoru. Systém neuvažuje žádné akumulátorové baterie, nýbrž přebytek elektrické energie z větrného zdroje využívá pro produkci vodíku v elektrolyzáru. Neřeší však problematiku uskladnění vznikajícího vodíku, což se jeví jako silně relevantní v případě, kdy není využito baterií. Nedostatky uvedené výše přináší i další důležitou informaci, a to, že PEMFC málokdy spolupracují pouze s jedním zdrojem energie nebo jedním druhem OZE. Aby mohlo dojít k simulaci celého hybridního systému, musí být řešena i tvorba matematických modelů OZE. Obecně existuje mnoho výrobců fotovoltaických modulů. Společným znakem modulů je však povinnost uvádět nominální štítkové hodnoty modulů. V kapitole 7 je proto představena problematika FVE modelů a jsou uvedeny vztahy vedoucí k jejich simulaci na základě parametrizace ze štítkových hodnot fotovoltaického modulu. Jelikož FVE představuje zdroj energie závislý na atmosférických podmínkách, je proto nezbytné zabývat se i výkonovou dostupností těchto zdrojů a také vhodností aplikovatelnosti hydrometeorologických modelů, jakožto vstupních dat pro model FVE. Další část parciálního řešení hybridního systému představuje kapitola 8. Teoreticky popisuje problematiku výroby elektrické energie pomocí větru a představuje vyjádření tvorby základního matematického popisu VTE.

Resumé

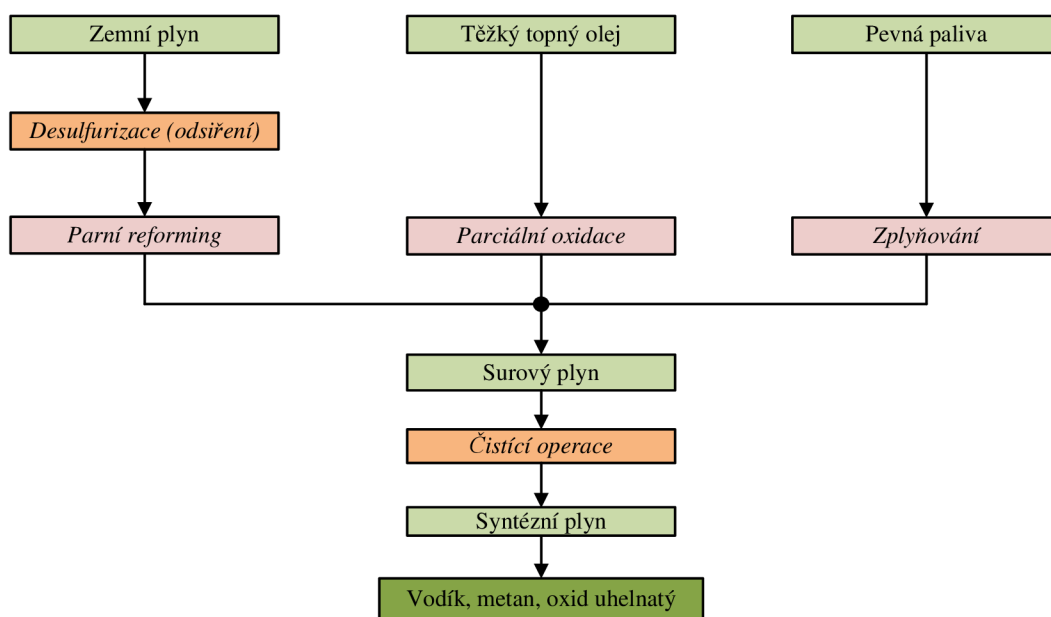
Kapitola informuje o nedokonalostech, kterými trpí aktuální matematické modely PEMFC nebo hybridní systémy využívající PEMFC. Některé skutečnosti poukazují na nutnost a oprávněnost vytvořit nový zdokonalený model PEMFC, který by současně uvažoval jednotlivé napěťové ztráty, změnu vnitřního odporu, změnu parciálních tlaků a dále by také respektoval změnu provozní teploty článku a skutečnost, že je vodík nejčastěji vyráběn ze zemního plynu. Představení provozovaných energetických systémů obsahující PEMFC a specifikující nedostatky modelů PEMFC jsou autorem publikovány formou review v [3]. Parciální řešení hybridního systému poukazuje také na nutnost tvorby matematických modelů OZE a potřebu zabývat se jejich výkonovou dostupností a vhodností hydrometeorologických modelů, jakožto vstupních dat.

4 Současná výroba vodíku

Kapitola představuje základní metody výroby vodíku z fosilních paliv, využívající zejména zemní plyn, a dále metody produkce vodíku přímo z vody. Dále kapitola přibližuje a popisuje možnosti skladování vodíku, jelikož se vodík vyznačuje značně specifickými vlastnostmi. Vodík vyžaduje zvýšené nároky nejen na jeho samotnou výrobu, ale také na jeho následné uskladnění a skladovací systémy, zejména u stacionárních palivových článků, kdy se skladuje ve značném množství. Ucelený přehled zmíněných výrobních procesů byl autorem představen v knize [4].

4.1 Základní metody výroby

V současnosti je vodík často vnímán jako ideální nosič energie, který by našel významnější uplatnění v budoucí energetice, protože při jeho spalování nevznikají oxidy síry nebo oxid uhličitý. Spalováním vodíku vznikají prakticky pouze oxidy dusíku NO_x a voda. Ve vodíku nebo v kombinaci vodíku a stacionárních palivových článků se vidí čistý a do budoucna perspektivní zdroj energie. Na druhou stranu, největší celkové zásoby vodíku v sobě ukrývá voda a uhlovodíkové látky (fosilní paliva). Základní možné metody produkce vodíku za využití fosilních paliv naznačuje Obr. 4.1 [4].



Obr. 4.1: Zjednodušené schéma základních metod výroby vodíku z fosilních paliv (převzato z [4])

Výroba vodíku je poměrně rozmanitá a existuje mnoho metod, jak vodík získat. Výrobu vodíku lze tedy v podstatě rozdělit na výrobu vodíku využívající fosilní paliva a výrobu využívající vodu. Je nutné si uvědomit, že i dnešní elektrárny s palivovými články využívají vodík, který je vyráběn výhradně z fosilních paliv. Jednotlivé metody

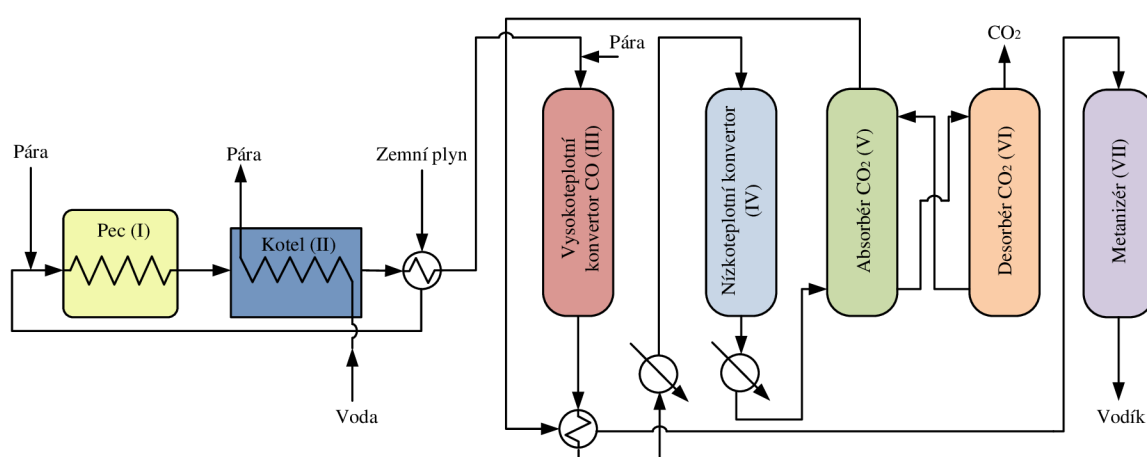
výroby se od sebe liší základním principem získávání vodíku a použitím různých vstupních surovin. Nejrozšířenější metody využívají jako vstupní surovinu zemní plyn. Běžně využívanou surovinou je i ropa, respektive kapalné a plynné frakce, které vznikají při její těžbě. K rozšířenějším metodám patří i zplyňování uhlí [44–48].

V dnešní době se začíná rozšiřovat i zplyňování biomasy. V současnosti poměrně málo používanou metodou je elektrolýza. Aktuální expanze obnovitelných zdrojů energie může proto ovlivnit i budoucí pohled na výrobu vodíku. Vodík by se tak mohl začít více vyrábět prostřednictvím elektrolýzy či pomocí vysokoteplotního rozkladu vody, dále pak zplyňováním nebo pyrolýzou biomasy. Zmíněné výroby by mohly využívat právě obnovitelných zdrojů (fotovoltaické, větrné elektrárny nebo elektrárny na biomasu) pro získání energie potřebné pro tyto procesy. Z obnovitelných zdrojů by se vodík ve větší míře mohl vyrábět lokálně, tj. v místě instalace obnovitelného zdroje. Mohl by se pak stát jednou z možných alternativ akumulace energie, která by byla využitelná při regulaci elektrizačních soustav.

Vysokoteplotní elektrolýza či výroba vodíku prostřednictvím termochemických cyklů by mohla najít širší uplatnění díky kombinaci s jadernou energetikou, konkrétně pak s jadernými reaktory IV. generace [49].

4.1.1 Parní reformování

Jednou z cenově nejpříjemnějších metod jak vyprodukovat vodík je takzvané parní reformování (SMR). Parní reformování je využíváno u lehkých uhlovodíků, jako je zemní plyn, nafta či zkapalněný ropný plyn. Nejčastěji reformovanou surovinou je zemní plyn. Na následujícím Obr. 4.2 [44] je naznačeno zjednodušené schéma výroby vodíku pomocí parního reformování.



Obr. 4.2: Systém výroby vodíku parním reformováním (modifikováno z [44])

K reakcím dochází za zmíněných teplot a tlaků v trubkovém systému umístěném v peci (I), který obsahuje vhodný katalyzátor (NiO). Vznikající produkty jsou vedeny do

kotle (II), kde prostřednictvím výměníku přispívají k produkci čisté páry. Jelikož další chemické reakce nejsou tolik energeticky náročné, je namístě si výrobou páry zlepšit energetickou bilanci procesu jako celku [44, 45]. Další část procesu souvisí s navýšením množství vyprodukovaného vodíku pomocí konverzních dějů. Ochladené produkty dále putují do konvertorů oxidu uhelnatého CO (III, IV). V konvertorech jsou CO a vodní pára přeměňovány na CO₂ a H₂, jak popisuje rovnice [44, 45]



Během procesu se využije vysokotlakého a nízkotlakého konvertoru a různě aktivních katalyzátorů. Kombinace konvertorů s různými tlaky souvisí i s eliminací sirných nečistot. Za konvertory jsou již ochlazené plynné produkty vedeny do absorbéru CO₂ (V), respektive do desorbéru CO₂ (VI), kde je provedena vypírka. V metanizéru (VII) jsou zbytky CO a CO₂ převedeny zpátky na CH₄. Čistý CO₂ se pak zpravidla vypouští do atmosféry či je zkapalněn. Zbylý CO a CO₂ se vede do metanizéru, kde se pomocí exotermických reakcí přemění zpátky na metan. Místo metanizéru a vypírky lze pro odstranění CO₂ a zbytků CO použít i tlakové adsorpční procesy (PSA) [44–46].

Zemní plyn se neskládá jen z metanu CH₄. Pro doplnění Tab. 4.1 [50] přibližuje zastoupení jednotlivých produktů daného plynu při SMR.

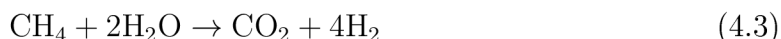
Tab. 4.1: Procentuální zastoupení produktů v plynu při výrobě H₂ pomocí SMR [50]

Použitá látka	H ₂ (obj. %)	CO ₂ (obj. %)	H ₂ O (obj. %)	N ₂ (obj. %)
metan CH ₄	64,1	16,3	17,8	1,8
metanol CH ₃ OH	61,8	21,1	14,1	3,0
etanol C ₂ H ₅ OH	62,6	21,4	12,5	3,5
Benzín, nafta - vyšší uhlovodíky	58,2	19,7	20,6	1,5

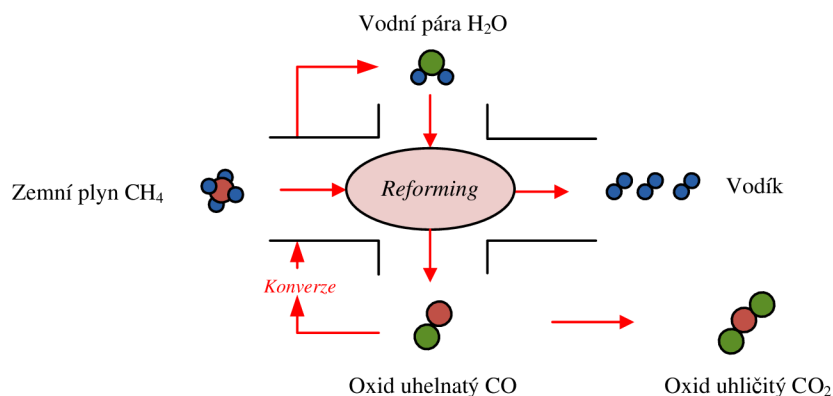
Zemní plyn tvoří i další složky, které mohou být také významně zastoupeny. Jedná se především o vodu, sirovodík H₂S, oxid uhličitý CO₂, dusík N nebo další uhlovodíky [50]. Jelikož například sloučeniny síry působí v tomto procesu negativně, musí být redukovány. Před samotným reformováním metanu tak musí být uskutečněna úprava zemního plynu pomocí aktivních uhlíkových filtrů nebo jiným postupem [44, 47, 48, 51]. Parní reformování využívající zemní plyn je možné popsat pomocí následujících chemických reakcí [44]



V menší míře dochází také k produkci oxidu uhličitého CO₂ dle rovnice [44]



Pro uskutečnění potřebných chemických reakcí je nutné dosáhnout poměrně vysokých teplot z důvodu vysoce endotermických reakcí a vhodných tlaků. V první části procesu se metan (zemní plyn) přivádí do vodní páry. Zjednodušené a schématické znázornění produkce vodíku prostřednictvím parního reformování ilustruje Obr. 4.3 [4].



Obr. 4.3: Základní schéma SMR a následné konverze oxidu uhelnatého (převzato z [4])

Obecně platí, že se teploty pohybují ve stovkách °C (vyšší teplota znamená i vyšší výtěžek H₂) a tlaky v jednotkách MPa (vyšší tlak znamená nižší výtěžek H₂ a menší rozměry systému) [44–46]. V současnosti představuje zemní plyn ideální zdroj vodíku zejména pro velké stacionární zdroje s palivovými články. Je však nutné podotknout, že díky zdokonalení technologie je dnes možné napájet i menší stacionární zdroje.

4.1.2 Parciální oxidace

Parciální oxidace (POX) je metoda uzpůsobená pro zpracování těžkých uhlovodíků (například těžké ropné zbytky - těžký olej), ale i pro metan, propan, etanol a další. Na rozdíl od parního reformování se jedná o rychlejší pracovní procesy. Porovnáním základních chemických reakcí parciální oxidace a parního reformování metanu lze konstatovat, že u parciální oxidace dojde k nižší výtěžnosti vodíku [44].

Základní rovnice parciální oxidace metanu jsou tyto [44]



Při oxidaci různých vstupních surovin se tvoří plynná směs CO, CO₂, H₂, CH₄ a H₂O a případně oxidy či sulfidy síry [44]. Konverze CO na vodík je následující



Porovnat POX s SMR umožňuje následující Tab. 4.1 [50], která vyjadřuje zastoupení jednotlivých produktů pro daný plyn, tentokrát však pro POX.

Vypírka CO₂ či metanizace jsou obdobné jako u parního reformování zemního plynu. Zbylé CO₂ se vypouští do atmosféry nebo se převádí do kapalné fáze. U parciální oxidace

Tab. 4.2: Procentuální zastoupení produktů v plynu při výrobě H₂ pomocí POX [50]

Použitá látka	H ₂ (obj. %)	CO ₂ (obj. %)	H ₂ O (obj. %)	N ₂ (obj. %)
metan	43,8	15,4	5,4	35,4
Benzín, nafta - vyšší uhlovodíky	32,0	19,4	5,8	42,8

těžkého oleje je surový produkt syntézní plyn, který je po čištění konvertován z CO a vodní páry na vodík a CO₂ [44]. Všechny procesy, kromě reformingu metanolu, mají konverzní reaktory pro snížení obsahu CO.

4.1.3 Zplyňování

Vodík lze vyrobit i z pevných fosilních paliv jako jsou například uhlí či koks. Tento proces se nazývá zplyňování nebo také zplyňování uhlí. Při procesu zplyňování je na rozžhavené uhlí přivedena vodní pára a vzduch. Díky vysokým teplotám, které mohou dosahovat až 1.200 °C, dojde ke vzniku směsi vodíku, dusíku, CO, CO₂ a CH₄. Jedná se ovšem o poměrně energeticky náročné procesy, protože významná část vstupujícího uhlí se musí využít pro udržení provozní teploty. Další nevýhodou je fakt, že je proces přímo závislý na fosilních palivech [49].

Alternativní řešení jsou hledána ve zplyňování biomasy. Zplyňování biomasy se děje pomocí dvou základních metod. U jedné metody dochází ke zplyňování v generátorech s pevným ložem (zplyňování při atmosférickém tlaku) a u druhé metody je biomasa zplyňována ve fluidních generátorech (vyšší tlak, jednotky MPa). Lze také konstatovat, že současné technologie pracují spíše při atmosférickém tlaku, jelikož jsou vyžadována zplyňovací zařízení malých výkonů. Základní chemická rovnice zplyňování biomasy je [52]



Následné konverze CO na vodík je obdobná jako v případě konverze dle rovnice (4.5).

4.1.4 Termochemické cykly

Termochemické cykly představují další alternativu, jak být při výrobě vodíku méně závislý na fosilních palivech. Obecný princip těchto cyklů je založen na procesu termochemického štěpení vody. Rozštěpení vody na kyslík a vodík se děje prostřednictvím několika chemických dějů. K realizaci těchto dějů je však potřeba tepelná energie. Zjednodušeně by se dalo říci, že k výrobě vodíku je nutná pouze voda a vysokopotenciální teplo. Jedná se totiž o uzavřené cykly, při kterých jsou ostatní chemické látky během reakcí recyklovány a vstupují poté znovu do výrobního procesu. Koncové výstupní produkty jsou pak vodík, kyslík a také nízkopotenciální teplo. Potvrzuje se i skutečnost, že s rostoucí teplotou roste i celková účinnost těchto cyklů, která dosahuje několik desítek

procent. Mezi nejznámější termochemický cyklus patří siřičito-jodový (takzvaný S-I cyklus). Existují i hybridní termochemické cykly, které kromě tepelné energie využívají i energii elektrickou, například hybridní cyklus kyseliny sírové [47, 49].

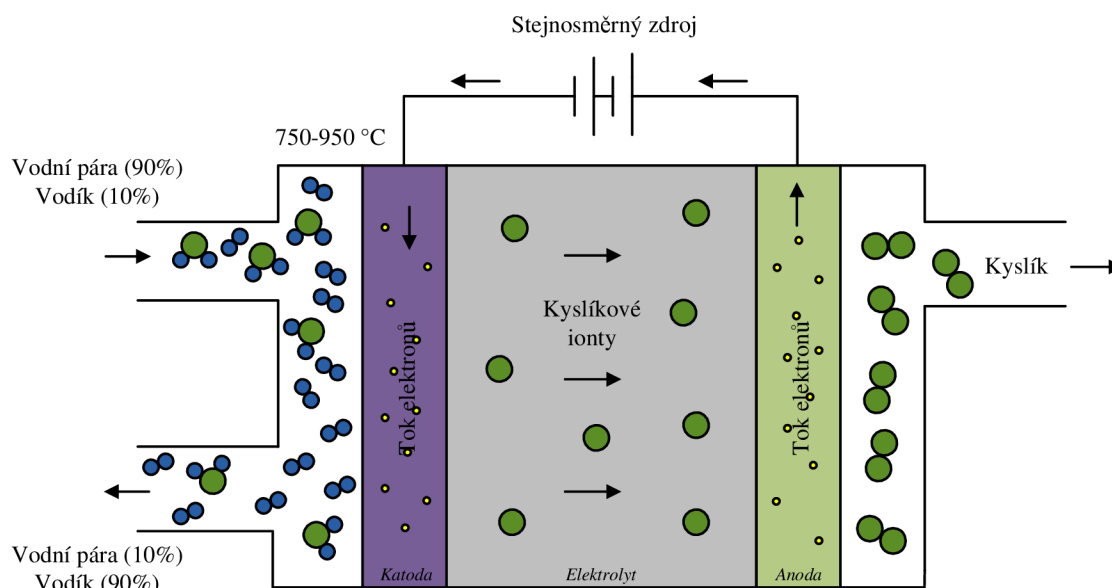
4.1.5 Elektrolýza

Obecně elektrolýza představuje proces, kdy vlivem průchodu stejnosměrného elektrického proudu vodným roztokem dochází ke štěpení chemické vazby mezi vodíkem a kyslíkem. Dochází tak k pohybu iontů obsažených v elektricky vodivé kapalině. Ionty dle svého náboje putují k opačně nabitým elektrodám za vzniku různých chemických reakcí. Základní rovnice elektrolýzy vycházejí z Faradayových zákonů. Podle nich jsou elektrický proud procházející elektrolytem a doba jeho působení přímo úměrné množství vyloučené látky (například vodík). Účinnost elektrolýzy je poměrně vysoká a může dosahovat hodnot, které se blíží 92 %. Tímto způsobem lze v elektrolyzérech vyrobit velmi čistý vodík, a to i za běžných teplot a tlaků. Kromě elektrolyzéro jsou nutné i další (pomocné) systémy. Jedná se zejména o různá čerpadla, střídače, usměrňovače, čističky vody a jiné. Výsledná účinnost systému jako celku se pak může pohybovat do 30 % [49, 53].

V současnosti má zmíněná metoda výroby vodíku minoritní zastoupení a pohybuje se v jednotkách procent. Na druhou stranu, výhodou metody je, že k výrobě velmi čistého vodíku potřebuje pouze zdroj vody a zdroj elektrické energie. Širší uplatnění je i možný způsob akumulace energie, kdy přebytky elektrické energie vyrobené z výkonově proměnlivých obnovitelných zdrojů energie (fotovoltaické a větrné elektrárny) jsou ukládány ve formě vyrobeného vodíku. Pokud by došlo k náhlým změnám elektrického výkonu v soustavě, vodík by mohl posloužit jako palivo pro vodíkové články, které budou schopny vyrobit část této chybějící energie.

4.1.6 Vysokoteplotní elektrolýza

U klasické elektrolýzy byla energie dodávána pouze ve formě elektrické energie. Zatímco u vysokoteplotní elektrolýzy je společně s elektrickou energií přiváděna ještě energie tepelná. Tepelná energie je dodávána ve formě směsi teplé páry a vodíku. Vstupující parní směs bývá například tvořena 90-ti procenty vodní párou a 10-ti procenty vodíku. Vystupující směs pak obsahuje 90 % vodíku a 10 % páry. Vstupující parní směs je přiváděna na katodovou stranu elektrolyzéro, odkud poté vystupuje i obohacená (o vodík) parní směs, jak ukazuje následující obrázek [49, 54]. Na Obr. 4.4 [4] je schématicky znázorněna vysokoteplotní elektrolýza. Parní směs je vedena dále na separátory, kde dojde k oddělení vodíku. Provozní teplota elektrolyzéro a parní směsi se pohybuje v rozmezí od 750 °C do 950 °C. Účinnost procesu může dosahovat až 50 %. Stupeň obohacení vystupující parní směsi je různý a závisí na parametrech vstupní parní směsi, na konstrukci elektrolyzéro a na celkovém konceptu dané výroby vodíku.



Obř. 4.4: Zjednodušené schéma vysokoteplotní elektrolýzy (převzato z [4])

Uváděný zjednodušený popis výroby vodíku nevede k produkci skleníkových plynů. Také je omezena závislost na fosilních palivech, nebude-li se uvažovat jejich případná spotřeba pro výrobu elektrické energie [54].

4.1.7 Jiné způsoby výroby

Z hlediska využitelnosti vodíku v energetice byly stručně představeny nejpoužívanější nebo nejvhodnější metody výroby vodíku. Mezi metody lze zařadit i procesy související se zpracováním biomasy, jako jsou například fotofermentace, anaerobní fermentace či pyrolýza. Existují však i další možnosti jak vyrobit vodík. V blízké budoucnosti širšího uplatnění v energetice pravděpodobně nedosáhnou.

4.2 Skladování vodíku

Obecně jsou na skladovací systém vodíku kladeny zvýšené konstrukční a bezpečnostní požadavky. Vodík spolu se vzduchem tvoří hořlavou a výbušnou směs v poměrně širokém rozsahu koncentrací. Vodík se také vyznačuje velmi malým rozměrem své molekuly, díky čemuž může snadno proniknout i pevnými materiály. Vodík je navíc bez zápachu a rychlou expanzí může dojít k jeho samovznícení. Zmíněné vlastnosti vodíku a další skutečnosti se musí proto respektovat i při jeho skladování. V dnešní době existuje několik způsobů jak vodík uskladnit. Mezi nejčastěji využívané způsoby patří skladování vodíku v plynném skupenství, kdy je vodík stlačen v tlakových nádobách. Vodík může být také nejprve zkapalněn a až poté skladován v tepelně izolovaných nádobách (případně i tlakových tepelných nádobách). Další možností je využití kovových hydridů či adsorpce na povrchu materiálu [51, 55–57].

4.2.1 Plynné skupenství

Skladování vodíku v plynném skupenství představuje energeticky mnohem méně náročný proces oproti skladování v kapalném stavu. Pro uložení plynného vodíku pro stacionární aplikace lze využít tlakové lahve nebo svazku tlakových lahví. Lahve se vyrábí z chrommolybdenové oceli, někdy jako bezešvé lahve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Nejčastější jsou o objemu 50 litrů (vodní objem) s natlakováním 20 MPa, kdy lahev obsahuje necelých 9 m³ vodíku. Pro samotné stlačení vodíku se používá zejména pístových kompresorů [51, 56, 57].

V případě požadavku většího množství vodíku, jsou jednotlivé lahve pevně spojeny do takzvaného svazku lahví. Jeden svazek je obvykle tvořen dvanácti lahvemi. Zmíněná řešení jsou však vhodná pro menší aplikace a systémy. Je-li požadavek na větší množství vodíku, vodík se zpravidla ukládá ve velkokapacitních vysokotlakých válcovitých zásobnících přímo v místě jeho spotřeby. Zásobníky mají horizontální nebo vertikální provedení a mají pracovní tlak 50 MPa [51].

Pro mobilní aplikace a systémy je pak možné využít tlakových lahví vyrobených z kompozitních materiálů pokrytých polymerem s objemem až 300 litrů. Existují i alternativní způsoby uskladnění plynného vodíku, a to v podobě podzemních úložišť, jako jsou vytěžené solné doly nebo místa, kde byl těžen zemní plyn [56, 57].

4.2.2 Kapalně skupenství

Při skladování v kapalném skupenství je zapotřebí vodík ochladit na jeho kondenzační teplotu (přibližně -253 °C při normálním tlaku). Toto ochlazení a následná komprese však může představovat až 40% ztrátu energie, která je nakonec v kapalném vodíku uložena. Zkapalnění je energeticky náročný proces a přistupuje se k němu tehdy, pokud mají být zajištěny vysoké hodinové spotřeby vodíku. Zvýšené nároky jsou kladeny i na použité materiály zásobníků, které musí udržovat tuto nízkou teplotu a minimalizovat tepelné ztráty do okolí. Kapalným vodík se proto ukládá do kryogenních zásobníků, které v praxi dosahují různých objemů. Ze zásobníků je pak čerpán jako plyn pro palivové články [55–57].

Nejčastější metodou výroby kapalného vodíku je metoda pomocí Claudova procesu. Metoda navíc zahrnuje i požadavek na použití čistého vodíku. Vodík je nezbytné čistit, aby neobsahoval další plyny s rozdílnými teplotami varu, které by při ochlazování ztuhly nebo zkapalněly [55–57].

4.2.3 Pevné látky

Tato forma skladování je v současnosti nadějí do budoucna. Prakticky existují dvě metody jak vodík na pevnou látku navázat. První metoda využívá fyzikálních principů, konkrétně separačního procesu adsorpce, kdy je plyn (vodík) hromaděn na povrchu

určité pevné látky (uhlíkaté struktury). Druhá metoda využívá chemických principů, kdy je vodík pomocí chemických vazeb přímo vázán do hmoty pevné látky (takzvaná nosná látka). Aby se vodík mohl navázat na daný materiál, musí dojít k chemické reakci mezi vodíkem a materiálem. Během této reakce se uvolňuje teplo a vodík je absorbován do materiálu. Pokud má být vodík následně využit, je potřeba teplo do systému opět dodat. Výhodou metody je, že po navázání vodíku není potřeba vysokých tlaků a nízkých teplot (kryogenních) [55, 56].

4.2.4 Jiné způsoby skladování

Z hlediska dlouhodobého skladování je vhodnější vodík převést na některou sloučeninu (metan, amoniak), která se snadněji zkapalňuje. Existují i výzkumy, kdy se vodík uchovává v takzvaných vodíkových tabletách. Tablety jsou tvořeny amoniakem, který je vázáný na mořskou sůl a uvolňuje se pomocí speciálního katalyzátoru [57].

Resumé

Kapitola informuje o základních metodách výroby vodíku. Jednou z cenově nejpříjemnějších metod jak vyprodukovat vodík, je parní reformování zemního plynu. Rovněž je nutné respektovat, že palivový článek potřebuje pro správný provoz vodík s dostatečnou čistotou. Zemní plyn se neskládá jen z metanu, je ale tvořen i mnoha dalšími složkami, které musí být případně redukovány. V současné době lze proces parního reformování použít i pro menší stacionární zdroje. V souvislosti se skladováním vodíku je třeba brát v úvahu jeho charakteristické vlastnosti, proto jsou na skladovací systémy kladeny i zvýšené konstrukční a bezpečnostní požadavky. Ucelený přehled zmíněných výrobních procesů a technologií uskladnění vodíku autor představil v knize [4].

5 Cíle disertační práce

Disertační práce se zabývá parciálním řešením hybridního systému využívající nízko-teplotní palivový článek (PEMFC) a obnovitelné zdroje energie (OZE). O oprávněném zájmu řešit tuto problematiku informují předešlé kapitoly 2, 3 a 4, které navíc specifikují hlavní nedostatky současných PEMFC modelů a hybridního systému jako celku. Jeden z hlavních cílů práce je zaměřen na návrh a analýzu nového matematického PEMFC modelu v prostředí MATLAB® a v MATLAB®/Simulink, jenž by vedl k eliminaci konkrétních nedostatků. Aktuální problematiku představují také matematické popisy jednotlivých OZE. Dalším cílem práce jsou tvorba komplexního matematického popisu fotovoltaického modulu, hodnocení výkonové disponibility těchto zdrojů a návrh větrného zdroje energie. Pro úspěšné vyřešení hlavních cílů práce je nutné splnit následující dílčí cíle.

5.1 Specifikace nedostatků současných systémů a modelů

Nejdříve je nutné identifikovat správné zákonitosti, závislosti a vazby, vedoucí ke správnému modelování PEMFC a hybridního systému jako celku. Na základě review provozovaných nebo modelovaných konceptů hybridních systémů v energetice pak provést specifikaci hlavních nedostatků modelů PEMFC. Specifikace nedostatků umožní vytvoření nového zdokonaleného dynamického modelu PEMFC.

5.2 Návrh a tvorba nového modelu PEMFC

Jedním z hlavních cílů je navrhnout a vytvořit nový matematický model PEMFC v MATLAB® a v MATLAB®/Simulink, který umožní vyšetřování jednak ustálených stavů PEMFC, ale také dynamického chování jeho elektrických a neelektrických veličin, a to v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Současné verifikované modely PEMFC obsahují specifické nedostatky, zejména díky zavádění zjednodušujících předpokladů, když některé dynamicky se vyvíjející veličiny jsou považovány za konstantní a některé závislosti nejsou uvažovány vůbec. Vytvořený model má proto představovat zdokonalené řešení vycházející z těchto verifikovaných modelů, jenž eliminuje hlavní nedostatky. Nový model má také respektovat skutečnost, že vodík je nejčastěji vyráběn ze zemního plynu, tudíž má obsahovat i model reforméru a jednoduchou regulaci provozních tlaků uvnitř článku. Nový model má být rozšířen také o model DC/DC konvertoru, což přispěje k jeho komplexnímu využití v rámci budoucích simulací hybridního systému.

5.3 Analýza provozních stavů PEMFC

Nový model PEMFC se využije pro analýzu různých ustálených provozních stavů palivového článku. Na modelu budou provedeny experimenty vedoucí k vyšetření dynamických změn napětí, výkonu a teploty článku pro dlouhodobý simulační scénář.

Model PEMFC rozšířený o model reforméru bude podroben tepelným experimentům, které ukážou vliv změny tepelné kapacity či tepelného odporu článku na jeho provozní teplotu a výstupní výkon. Další provedené experimenty budou analyzovat elektrické poměry na DC/DC konvertoru a budou informovat o dalších neelektrických veličinách článku.

5.4 Návrh komplexního modelu fotovoltaického modulu

Dalším cílem je navrhnout a vytvořit model fotovoltaického modulu v MATLAB®, který bude založen na parametrizaci výhradně ze svých štítkových hodnot, čímž se docílí snadné a hlavně praktické aplikovatelnosti. Vytvořený model má respektovat i teplotní závislost jednotlivých vnitřních odporů fotovoltaického modulu, což jednotlivé modely často neuvažují. Rovněž má být implementován iterační výpočet odporů využívající pouze štítkových hodnot.

5.5 Analýza navrženého fotovoltaického modelu

Vytvořený model fotovoltaického modulu bude následně podroben verifikaci. Posléze bude provedena simulace fotovoltaického subsystému, který má navíc v simulacích vhodně implementovat reálně změřená hydrometeorologická data.

5.6 Analýza výkonové disponibility fotovoltaického zdroje a ověření vhodnosti veřejné databáze

Dalším cílem je tvorba aplikace v programu MATLAB®, která má zpracovat a vyhodnotit data získaná z kontinuálního měření statického fotovoltaického modulu. Vyhodnocení má poskytnout informace o výkonové disponibilitě fotovoltaického zdroje v dané lokalitě, což je vzhledem k charakteru těchto zdrojů cenná znalost. Aplikace má dále umožnit porovnání slunečního záření dopadajícího na referenční fotovoltaický modul s hodnotami množství sluneční energie obsažených ve veřejně přístupné databázi.

5.7 Model větrného zdroje energie

Cílem práce je také popsat a simulovat zjednodušený model větrného zdroje energie a nastítnit následné práce, které by vedly k jeho budoucímu zdokonalení a rozšíření.

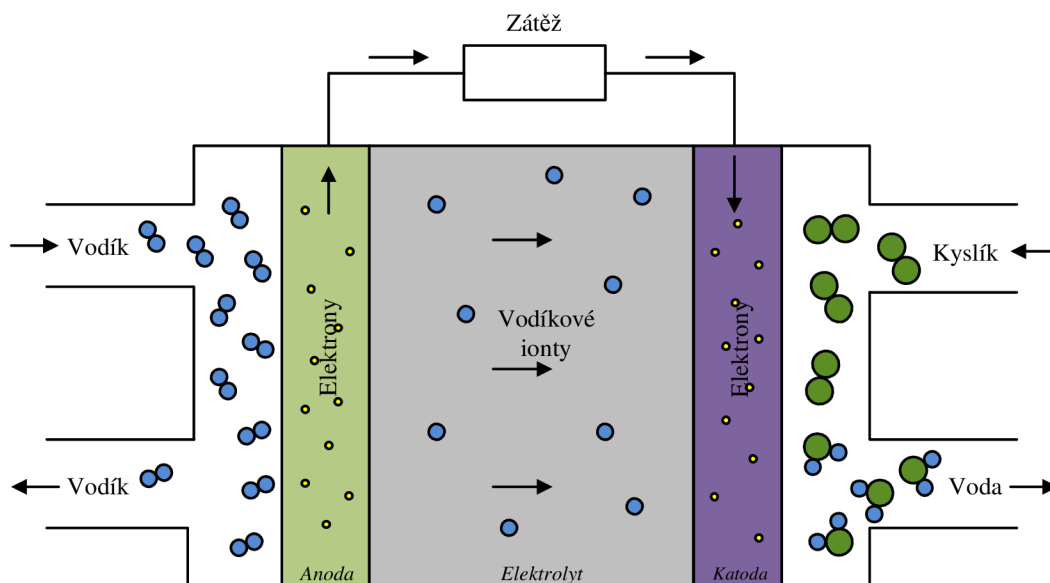
6 Palivový článek PEMFC a jeho simulace

Kapitola seznamuje s principem palivového článku typu PEMFC a představuje jeho základní konstrukční provedení. Podrobně se zabývá problematikou matematického modelování PEMFC a přesně definuje provázanost jednotlivých veličin. Následně je navržen nový matematický model PEMFC vytvořený v MATLAB® a MATLAB®/Simulink, který umožňuje analýzu vývoje elektrických a neelektrických veličin PEMFC v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží a který byl společně s výsledky autorem publikován v [35]. V kapitole jsou dále představeny výsledky tepelných experimentů a dynamického chování PEMFC, které byly získány pomocí nového modelu rozšířeného navíc o reformér a DC/DC konvertor. Tato rozšíření jsou v kapitole rovněž popsána a jednotlivé výsledky byly autorem zveřejněny v [58] a v [59].

6.1 Princip palivového článku

Obecně, palivový článek představuje elektrochemický zdroj energie, který přeměňuje chemickou energii paliva přímo na energii elektrickou [35]. Díky elektro-chemickým procesům v palivových člancích dochází k přímé přeměně chemické energie vázané v palivu na energii elektrickou, respektive na stejnosměrný elektrický proud [4], a to bez nutnosti využít tepelný nebo mechanický přechodný mezistupeň.

Za obecného předpokladu, že se palivový článek skládá ze dvou elektrod (anody, katody), katalyzátoru a elektrolytu, může být základní princip palivového článku ilustrován dle Obr. 6.1 [4]. Podrobnější popis samotné konstrukce palivového článku je uveden v podkapitole 6.2.



Obr. 6.1: Schématické znázornění toků jednotlivých reaktantů a produktů základních chemických reakcí nízkoteplotního palivového článku PEMFC (převzato z [4])

Tento Obr. 6.1 [4] koresponduje se základními chemickými rovnicemi (6.1), (6.2) a (6.3) [37, 38, 60], které prostřednictvím chemických procesů demonstrují základní princip PEMFC.

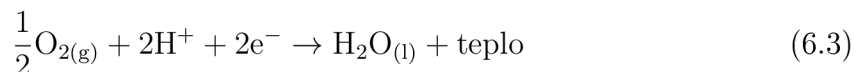


Rovnice (6.1) informuje, že voda a teplo vznikající v palivovém článku, jakož i elektrická energie, jsou produkty chemické reakce mezi vodíkem a kyslíkem. Tvorba vody pak může představovat určitý ukazatel aktivity palivového článku, který se dá využít například i k odhalení poškozené části palivového článku, jelikož poškozená část může být charakterizována nízkou koncentrací vody (tj. nedostatečnou tvorbou vody) nebo mohou vznikat naopak vysoké koncentrace vody. Z molárního pohledu, rovnice (6.1) popisuje proces, při kterém dochází kombinací jednoho molu plynného vodíku s polovinou molu plynného kyslíku k produkci jednoho molu vody [38].

Pomocí proudových (průtokových) kanálů jsou na elektrody přiváděny aktivní materiály (jednotlivé reaktanty), které jsou nezbytné pro správnou funkci palivového článku.



Dle rovnice (6.2) přiváděné palivo H_2 na anodě oxiduje. Styk molekul vodíku s katalyzátorem na povrchu membrány (elektrolyt) vyvolá reakci, při které dojde ke vzniku iontů vodíku H^+ a elektronů e^- . Elektrony jsou poté jímány elektrodou (anoda) a jsou přivedeny vnějším obvodem (vnější elektrickou zátěží) na druhou elektrodu (katoda). Ionty H^+ putují od elektrody (anody) elektrolytem k druhé elektrodě (katodě).

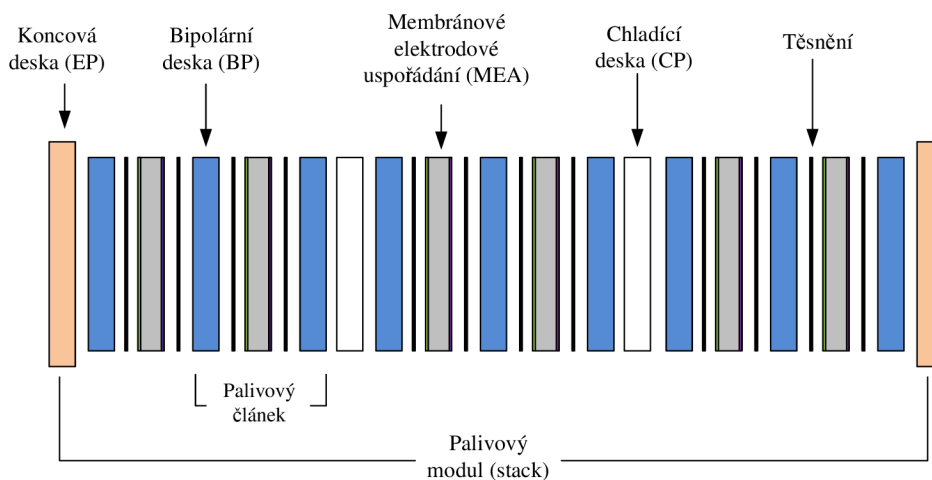


Rovnice (6.3) popisuje skutečnost, že je na katodu přiváděn kyslík O_2 , který reaguje společně s ionty H^+ a elektrony e^- za vzniku vody H_2O . Voda je pak z palivového článku odváděna [4]. Detailnější popis principu palivových článků je představen například v [61] a podrobný výpočet hodnot jednotlivých toků reaktantů PEMFC je řešen v [62].

6.2 Konstrukce a technické provedení

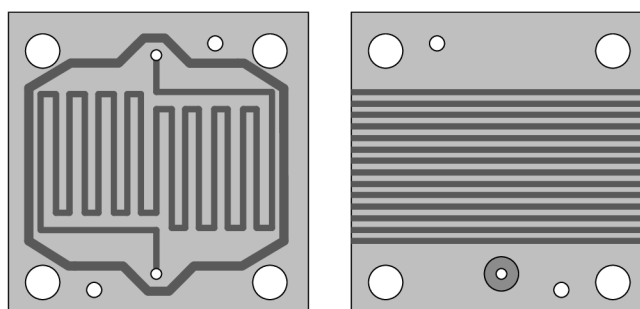
Lze konstatovat, že základní konstrukce palivových článků je pro všechny typy obdobná, jelikož vychází ze samotného principu palivového článku [4]. Skutečný palivový modul se skládá z jednotlivých, do série zapojených, palivových článků. Mezi jednotlivé články se často vřazují chladicí desky (CP), umožňující odvod nežádoucího tepla prostřednictvím proudění chladicího média. Dále je nutné zajistit, aby palivový modul vykazoval i dobré mechanické vlastnosti a jednotlivé komponenty byly drženy na svých pozicích. K tomu slouží koncové desky (EP) umístěné na koncích palivového modulu, které plní zejména mechanickou funkci [10, 63, 64].

Obecné konstrukční uspořádání PEMFC palivového modulu (z anglického fuel cell stack) je ukázáno na Obr. 6.2 [4]. Samostatný palivový článek se skládá z plynových



Obr. 6.2: Konstrukční schéma řazení jednotlivých palivových článků do palivového modulu (převzato z [4])

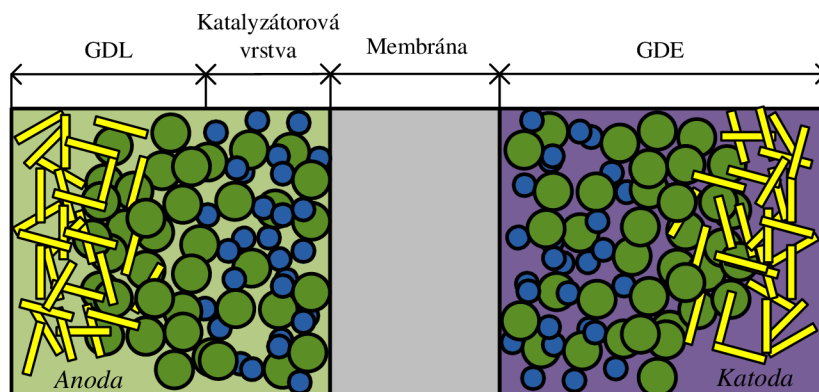
kanálů na bipolární desce (BP). Bipolární desky využívají grafitových polymerů, jelikož se grafit obecně vyznačuje výbornou elektrickou vodivostí a dobrou odolností proti korozi. Negativní vlastností grafitu je však jeho pórovitá struktura, přes kterou může docházet k únikům plynného paliva. Desky musí být proto tvořeny dalšími materiály, které mají zajistit lepší neprůchodnost. Na následujícím Obr. 6.3 [4] je ukázáno možné serpentinové řešení rozvodných plynových kanálů u bipolárních desek, kterými jsou palivo a oxidant (obecně plyny) přiváděny do palivového článku [10, 63, 64].



Obr. 6.3: Serpentinové řešení rozvodných kanálů bipolární desky z grafitových polymerů (převzato z [4])

Pomocí těchto desek jsou pak plyny rozváděny na elektrody, které se skládají z jímače volných elektronů (CC), respektive z difúzní vrstvy (GDL), která má zajistit rovnoměrnost šíření plynů ke katalytické vrstvě či odvod produktů reakce od katalytické vrstvy. Prostřednictvím elektrod je napájen vnější elektrický obvod připojený k zátěži. Elektrody se často vyrábí z uhlíku C a teflonu (PTFE) a nejčastějšími katalyzátory bývají drahé kovy jako například platina Pt, ale i palladium Pd [10, 63, 64].

Dále je článek složen z elektrolytu, ten odděluje anodovou a katodovou část článku. V případě nízkoteplotního článku je elektrolyt tvořen polymerní elektrolytickou membránou (někdy též nazývaná jako iontoměničová membrána), která slouží jako přenašeč iontů a současně jako zábrana pro elektrony [10, 63, 64]. Obr. 6.4 [4] přibližuje využití takzvaného membránového elektrodového uspořádání (MEA), které je u nízkoteplotních palivových článků často využíváno.



Obr. 6.4: Detailní náhled na rozhraní elektrolyt, porézní elektroda, katalyzátor (modifikováno z [64])

Obecně se dá říci, že se MEA skládá z polymerové iontoměničové membrány, na které jsou nalisované vrstvy katalytické a GDL s CC, což navzájem tvoří takzvanou plynovou difúzní elektrodu (GDE). Bližší informace související s polymerovou membránou jsou uvedeny níže v textu. Difúzní vrstva zajistí rovnoměrnou distribuci plynů ke katalytické vrstvě a odvod produktů reakce od katalyzátorové vrstvy. Katalyzátorová vrstva plní v probíhajících chemických reakcích katalytickou úlohu a reakce usnadňuje. Jednotlivé reaktanty (plyny) jsou tedy rovnoměrně rozváděny na elektrody, jejichž prostřednictvím je dále napájen vnější elektrický obvod připojený k zátěži [63, 64].

Elektrody shromažďují elektrony e^- a nesou elektrický proud. Elektrody proto musí splňovat určitá kvalitativní kritéria. Musí mít zejména dobrou vodivost (dobře vede proud), dobrou chemickou stabilitu vůči elektrolytu (nedochází ke korozi), dobré katalytické vlastnosti (usnadňuje reakce) a dobré mechanické vlastnosti (nejsou ovlivňovány vysokými teplotami). Jedním z úkolů vysoké poréznosti elektrod je, aby palivo či oxidant mohl projít až k elektrolytu. Porézní elektroda má houbovitou strukturu a skládá se z drobných zrn vhodného kovu nebo uhlíku, na kterých je nanášena vrstva vhodného katalyzátoru (v případě PEMFC platina). Reakce potom probíhají na rozhraní elektroda (+ katalyzátor) - palivo (či oxidant) - elektrolyt. Elektrody tak musí mít co možná největší účinnou plochu, na které může docházet k reakcím. Jednoduše řečeno, elektrická energie je generována tak dlouho, dokud je do článku přiváděno palivo. Pojmeme palivový článek bude dále v textu uvažován celý palivový modul [10, 64].

Je zřejmé, že z pohledu konstrukce palivových článků je zapotřebí využít materiálů se specifickými vlastnostmi. Používané materiály pro jednotlivé základní komponenty nízkoteplotních palivových článků PEMFC jsou obsaženy v Tab. 6.1 [65], kde je uvedena i obecná charakteristika konkrétní části článku, vyplývající z principu její funkce.

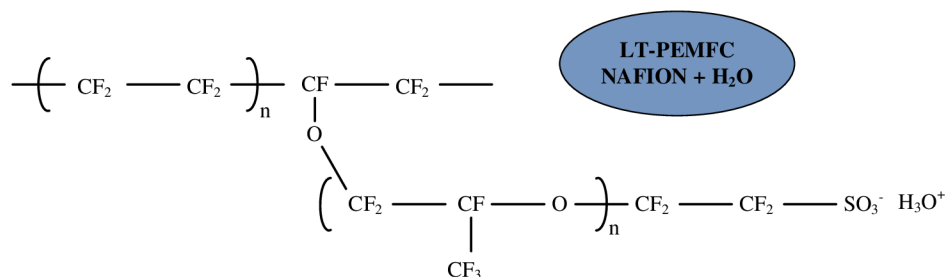
Tab. 6.1: Používané materiály pro jednotlivé základní komponenty nízkoteplotních PEMFC [65]

Komponenta	Charakteristika	Běžný typ
Membrána	Umožňuje putovat vodíkovým protonům od anody ke katodě	viz. Tab. 6.2 [66]
Katalyzátorová vrstva	Vytvoří z paliva protony a elektrony, Protony kombinují s oxidantem za vzniku vody na katodě, Elektrony putují do zátěže	Platinum/uhlík
Plynová difúzní vrstva (GDL)	Umožňuje palivu/oxidantu putovat přes porézní vrstvu, zátímco sbírá elektrony	Uhlíková tkanina nebo uhlíkový papír Toray
Kanály bipolárních desek	Distribuuje palivo a oxidant na plynové difúzní vrstvy	Grafit, nerezová ocel
Těsnění	Brání úniku paliva, Pomáhá rovnoměrně distribuovat tlak	Silikon, teflon
Koncové desky (EP)	Drží jednotlivé vrstvy na svých pozicích	Nerezová ocel, grafit, polyethylen, PVC

6.2.1 Polymerní membrána

Za nejdůležitější část palivového článku se považuje polymerní membrána, někdy též nazývaná jako iontoměničová membrána. V principu se jedná o elektrolyt, který slouží jako přenašeč iontů, zábrana pro elektrony a současně odděluje anodovou a katodovou část článku. Palivové články, které využívají membránu tvořenou sulfovanými fluoropolymerem se vyznačují vysokou proudovou hustotou, vysokým měrným výkonem vztaheným na jednotku objemu palivového článku, dobrou regulovatelností výkonu a možností uskutečnit studený start [4].

Náhled na molekulu membrány tvořenou sulfovanými fluoropolymery je uveden na Obr. 6.5 [13].



Obr. 6.5: Detailní náhled na molekulu nafion membrány nízkoteplotních PEMFC (modifikováno z [13])

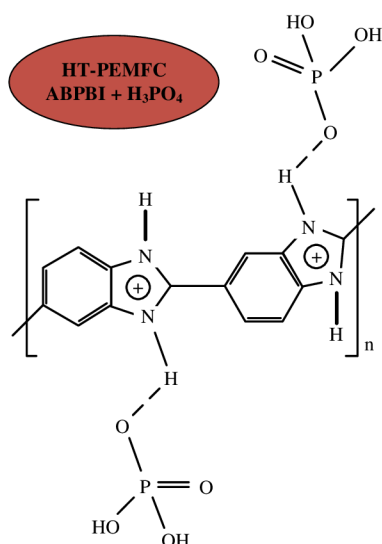
Jelikož jsou membrány založeny na vodní bázi, je důležité, aby byla membrána při provozu hydratována a byla tak zajištěna její vodivost [4]. Nafion membrána, vyráběná americkou Du Pont Company, je komerčně dostupná v několika provedeních s ekvivalentní hmotností (900, 1.100, 1.200 a jiné) [66]. Další typy membrány jsou uvedeny v Tab. 6.2 [66].

Tab. 6.2: Fyzikální parametry dalších typů membrán s různými EW (při $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $RH = 100\%$) [66]

Označení membrány	Typ membrány	IEC ($\text{meq}\cdot\text{g}^{-1}$)	Tloušťka (mm)	Vodivost ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
K 101	sulfovaný polyarylen	1,4	0,24	0,01140
CMV	sulfovaný polyarylen	2,4	0,15	0,00510
Flemion	perfluorované	-	0,15	-
MC 3470	-	1,5	0,60	0,00750
61AZL386	-	2,3	0,50	0,00810
R-1010	perfluorované	1,2	0,10	0,00333

Jedná se například o membrány japonských společností Asahi Glass Company Ltd. (CMV, Flemion) a Asahi Chemical Industry Company Ltd. (K 101) nebo amerických společností Ionac Chemical Company (MC 3470), Ionics Inc. (61AZL386) a Pall RAI Inc. (R-1010) [66].

V podkapitole 2.2 byla představena alternativa membránového článku HT-PEMFC, který dosahuje o něco vyšších provozních teplot a může tak disponovat pomyslně širším portfoliem uplatnění. Pro částečné doplnění i této technologie je na Obr. 6.6 [13] detailní náhled na molekulu využívanou u těchto membrán.



Obr. 6.6: Detailní náhled na molekulu poly(2,5-Benzimidazol) membrány s označením ABPBI (modifikováno z [13])

Obr. 6.6 [13] uvažuje jednu z možných alternativ membrány HT-PEMFC, konkrétně pak membránu složenou z benzimidazolových heterocyklických sloučenin, kdy je možné dosáhnout provozních teplot až 200 °C [12, 13].

6.3 Popis vstupních parametrů palivového článku

Podrobnou analýzu procesů je možné realizovat na základě užití tzv. termodynamických potenciálů, které jsou vhodné právě pro chemické termodynamické reakce nebo ne-cyklické procesy. Těmito potenciály jsou vnitřní energie, entalpie, Helmholtzova volná energie a Gibbsova volná energie [67].

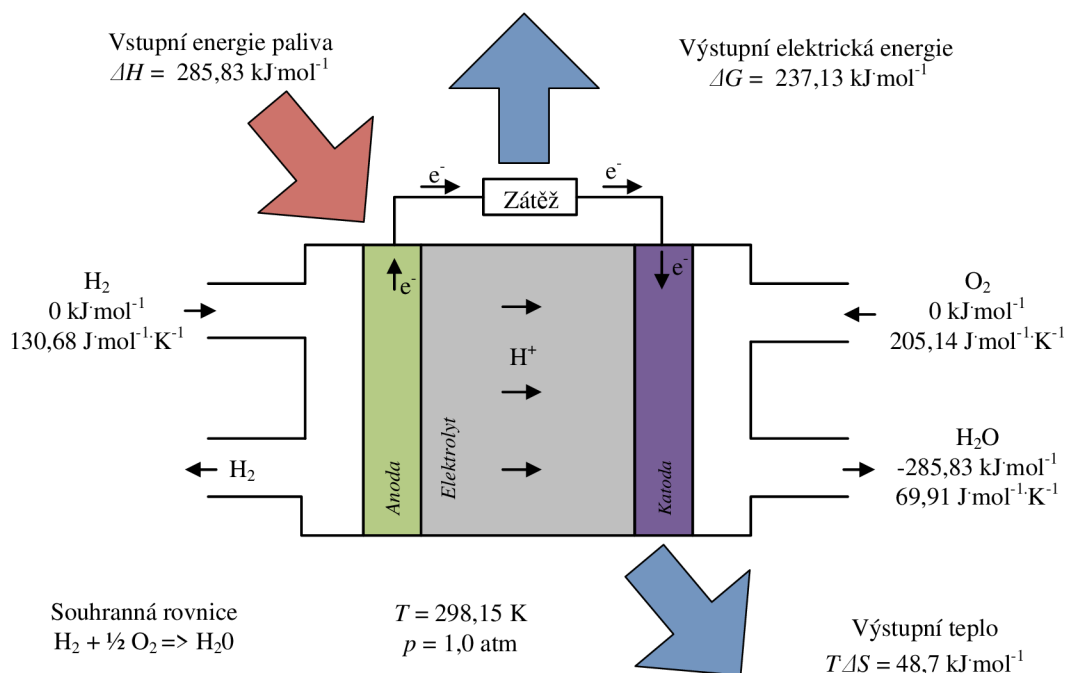
Vnitřní energie U představuje určitý obsah energie libovolné soustavy (systému), přitom může být různé povahy. Samotná vnitřní energie je funkcí této soustavy a je určena stavovými proměnnými (například tlak, objem, teplota) jak ukazuje následující rovnice [68].

$$\Delta U = \Delta H - p \cdot \Delta V, \quad (6.4)$$

kde ΔU je změna celkové vnitřní energie (J), ΔH je změna entalpie (J) a ΔV je změna objemu (m^3). Lze konstatovat, že energie palivového článku je zajištěna kombinací atomů a snížením objemů reaktantů (obecně plynů). Obě tyto energetické změny jsou zahrnuty právě ve změně entalpie [67].

$$\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V \quad (6.5)$$

Následující Obr. 6.7 [4] vyjadřuje znázornění jednotlivých energetických toků palivového článku.



Obr. 6.7: Schématické znázornění toků energií u ideálního nízkoteplotního palivového článku PEMFC (převzato z [4])

Systém, který teoreticky vychází z chemických rovnic (6.1), (6.2), (6.3) a který je realizován při standardních podmínkách (tj. atmosférický tlak 101.325 Pa a teplota 298,15 K) vykoná práci, jež odpovídá následujícímu číselnému vyjádření [67]. Proto součin $p \cdot \Delta V$ v rovnici (6.5) představuje svým způsobem práci systému W .

$$W = p \cdot \Delta V = (101.325 \text{ Pa})(1,5 \text{ mol})(-22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}) \left(\frac{298,15 \text{ K}}{273,15 \text{ K}} \right) \quad (6.6)$$

Při reálném provozu palivového článku je nutné respektovat změnu termodynamických podmínek a zohlednit stavové veličiny, jako jsou například tlak či koncentrace jednotlivých plynů. Teorie palivového článku vychází z předpokladu, že množství energie, které je možné přeměnit na užitečnou elektrickou práci, je dáno právě Gibbsovou volnou energií. Při reálném provozu však Gibbsova volná energie není konstantní a mění se s teplotou a se stavem jednotlivých látek, které se reakcí účastní. Gibbsova energie proto představuje velmi užitečný parametr.

Na samotnou Gibbsovu energii pak lze pohlížet jako na stavovou termodynamickou veličinu, která charakterizuje schopnost látek vstupovat do chemických reakcí a vyjadřuje skutečnost, že během reakcí dochází k tepelné výměně [37].

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S, \quad (6.7)$$

kde ΔG je změna Gibbsovy volné energie (J), T je absolutní teplota (K) a ΔS je změna entropie ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$). V rovnici (6.7) představuje člen $T \cdot \Delta S$ vázanou energii, která

odpovídá části energie, jenž nemůže být přeměněna na práci a je proto vyloučena do okolí, jak deklaruje i Obr. 6.7 [4]. Celková entropie v reakci se nesníží, ale entropie plynů se během reakcí sníží o konkrétní hodnotu, protože počet molekul vody je menší než počet reagujících molekul vodíku a kyslíku [67]. Za standardních podmínek je možné jednotlivé změny entalpie ΔH_i^0 nebo entropie ΔS_i^0 popsat jako rozdíl molární formace entalpie, případně entropie, mezi produkty a reaktanty (reagující látky) [61]. Množství energie jednoho molu vodíku, které může poskytovat elektrickou energii, se vyjádří dle vztahu

$$\Delta G^0 = \Delta H_{H_2O}^0 - (\Delta H_{H_2}^0 + 0,5 \cdot \Delta H_{O_2}^0) - T_0 [\Delta S_{H_2O}^0 - (\Delta S_{H_2}^0 + 0,5 \cdot \Delta S_{O_2}^0)], \quad (6.8)$$

kde ΔG^0 je změna Gibbsovy volné energie při standardních podmínkách (J), $\Delta H_{H_2O}^0$ je změna entalpie vody při standardních podmínkách (J), $\Delta H_{H_2}^0$ je změna entalpie vodíku při standardních podmínkách (J), $\Delta H_{O_2}^0$ je změna entalpie kyslíku při standardních podmínkách (J), T_0 je standardní teplota (K), $\Delta S_{H_2O}^0$ je změna entropie vody při standardních podmínkách ($J \cdot K^{-1}$), $\Delta S_{H_2}^0$ je změna entropie vodíku při standardních podmínkách ($J \cdot K^{-1}$) a $\Delta S_{O_2}^0$ je změna entropie kyslíku při standardních podmínkách ($J \cdot K^{-1}$). Pokud podmínky, při kterých se palivový článek provozuje, jsou rovny standardním podmínkám (tj. $T_0 = 298,15$ K, $p = 1,0$ atm) platí následující Tab. 6.3 [61,67].

Tab. 6.3: Termodynamické potenciály při standardních podmínkách [61,67]

Látka	ΔH_i^0 ($J \cdot mol^{-1}$)	ΔS_i^0 ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)
Vodík	0	130,684
Kyslík	0	205,138
Voda	$-285,83 \cdot 10^3$	69,91

V situaci, při které by palivový článek pracoval na základě vratných chemických reakcí, tzn. nevznikaly by při provozu palivového článku ztráty, lze konstatovat, že hodnota změny Gibbsovy volné energie odpovídá hodnotě energie, která byla přeměněna na energii elektrickou.

$$E_0 = -\frac{\Delta G^0}{n \cdot F}, \quad (6.9)$$

kde E_0 je napětí palivového článku při standardních podmínkách (V), n odpovídá počtu elektronů na reagující iont či molekulu (-) a F je Faradayova konstanta ($C \cdot mol^{-1}$). Obecně standardní potenciál nebo-li napětí palivového článku, vyjadřuje reakční potenciál při standardních podmínkách. Z pohledu termodynamiky nastanou standardní podmínky při teplotě 298,15 K (25 °C) a tlaku 1,0 atm (101.325 Pa). Standardní potenciál (6.9) tedy vyjadřuje ideální stav při standardních podmínkách palivového článku.

6.3.1 Výstupní napětí PEMFC

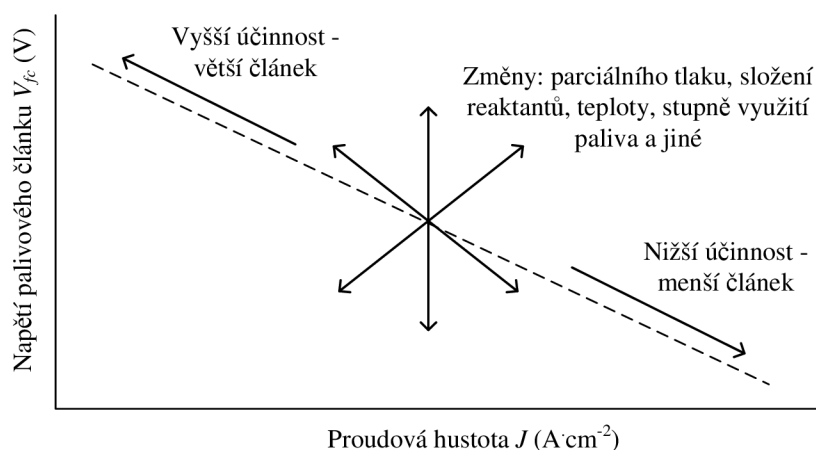
Na základě principu palivového článku může být jeho teoreticky dosažitelné napětí popsáno pomocí Gibbsovy volné energie. Respektují-li se reálné podmínky, při kterých je palivový článek provozován, lze teoreticky dosažitelné napětí vyjádřit pomocí Nernstovy rovnice (6.11). Nernstova rovnice umožní definovat napětí palivového článku pro konkrétní konstantní hodnoty teploty a jednotlivých parciálních tlaků [30, 39, 69]. Popisuje tak odchylky napětí, od napětí dosaženého při standardních podmínkách, a to pro konkrétní ustálený stav palivového článku.

$$E_{Nernst} = E_0 + \frac{\Delta S}{2 \cdot F}(T - T_0) + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right), \quad (6.10)$$

kde E_{Nernst} je Nernstovo napětí (V), ΔS je změna entropie ($J \cdot K^{-1}$), T je absolutní teplota palivového článku (K) a T_0 je standardní teplota (K), R je univerzální plynová konstanta ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$), p_{H_2} je parciální tlak vodíku (atm), p_{O_2} je parciální tlak kyslíku (atm) a p_{H_2O} je parciální tlak vody (atm). Publikace [70] nabízí odlišné vyjádření napětí (6.11), kdy je uvažován i celkový tlak uvnitř palivového článku a které je matematicky přesnější.

$$E_{Nernst} = E_0 + \frac{\Delta S}{2 \cdot F}(T - T_0) + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O} \cdot \sqrt{p}} \right), \quad (6.11)$$

kde p je celkový tlak uvnitř palivového článku (atm). Rovnice (6.10) a (6.11) definují teoreticky dosažitelné napětí palivového článku při konkrétních provozních podmínkách. Následující Obr. 6.8 [71] ukazuje závislosti změn jednotlivých provozních veličin palivového článku na jeho napětí.



Obr. 6.8: Vliv změny jednotlivých provozních parametrů palivového článku na jeho výstupní napětí (modifikováno z [71])

Při reálném provozu palivového článku nejsou teplota, tlak či koncentrace reakčních plynů konstantní, což má přímý vliv na napětí a účinnost. Je tedy důležité vědět, jakých

parametrů lze dosáhnout při různých teplotách, tlacích či koncentracích plynů. Reálné napětí palivového článku V_{fc} je však ve skutečnosti nižší než napětí teoretické E_{Nernst} . Tuto skutečnost lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu (6.12), kdy je Nernstovo napětí E_{Nernst} redukováno o jednotlivé napěťové ztráty [60].

$$V_{fc} = N_0 (E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con}), \quad (6.12)$$

kde V_{fc} je výstupní napětí (V), N_0 je počet palivových článků v sérii (-), V_{act} představuje aktivační ztráty palivového článku (V), V_{ohm} představuje ohmické ztráty palivového článku (V) a V_{con} představuje koncentrační ztráty palivového článku (V).

6.3.2 Napěťové ztráty PEMFC

Při popisu principu palivového článku je nezbytné brát v úvahu skutečnost reálných chemicko-fyzikálních procesů [72]. Zmíněné procesy však s sebou nesou určitá omezení. Vznikají vnitřní ztráty, které se v literatuře [37, 65] označují jako takzvané polarizace. V souvislosti s tím pak bývá i V-I charakteristika palivového článku označována jako charakteristika polarizační. V důsledku nevratných elektrochemických procesů klesá velikost napětí v závislosti na rostoucím proudu [73]. Nejvyšší dosažitelné napětí palivového článku je při chodu naprázdno. Napěťové ztráty mají samozřejmě i zásadní vliv na účinnost palivového článku [35]. Vzhledem k tomu, že každý palivový článek využívá technologie rozdílných vlastností, jsou i ztráty ovlivněny odlišnými chemickými a fyzikálními činiteli, které však limitují proces reakce při průchodu proudu palivovým článkem [72].

Za základní a nejvýznamnější ztráty se považují ztráty aktivační, ohmické a koncentrační. Aktivační ztráty mají logaritmický průběh a významně ovlivní napětí palivového článku pro nízké elektrické proudy. Pro středně velké proudy (z provozního rozsahu článku) se uplatňuje lineární pokles způsobený ohmickými ztrátami, jež jsou závislé na teplotě článku či obsahu vody ve článku. Pro velké proudy respektive velké proudové hustoty jsou charakteristické, exponenciálně se uplatňující, koncentrační ztráty. Koncentrační ztráty klesají s rostoucí teplotou a tlakem [40]. Dále je možné říci, že u zmíněné polarizační charakteristiky dochází k jejímu navýšení, a to se vzrůstající provozní teplotou či provozním tlakem článku [72]. Tyto skutečnosti jsou více přiblíženy a demonstrovány v podkapitole 6.4, kdy je vyšetřován ustálený stav modelovaného palivového článku.

6.3.2.1 Aktivační ztráty

Aktivační ztráty palivového článku jsou způsobeny zpomalením chemických reakcí na povrchu elektrod [37, 60, 62]. Tyto ztráty lze vyjádřit pro jednotlivé typy elektrochemických reakcí buď pomocí Tafelovy rovnice (6.13) [37] nebo na základě empirického

stanovení (6.14) [74]. Grafické vyjádření rovnice (6.13) představuje závislost přepětí na logaritmu proudové hustoty. Toto vyjádření se označuje jako Tafelova křivka. Průběh přepětí k logaritmu proudové hustoty je možné aproximovat přímkou [72].

$$V_{act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \ln \frac{j}{j_0} \quad (6.13)$$

kde α je koeficient přenosu náboje (-), j je proudová hustota ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$) a j_0 je výměnná proudová hustota ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$). První zlomek rovnice (6.13) představuje v ustáleném stavu konstantu, která nabývá vyšších hodnot pro chemické reakce, které probíhají pomaleji. Koeficient α představuje část elektrické energie, která se využije pro změny rychlosti elektrochemické reakce. Velikost hodnoty tohoto koeficientu závisí na probíhající reakci a na materiálu jednotlivých elektrod [72]. Rovnice explicitně vyjadřuje ztráty palivového článku. Lze konstatovat, že rovnice platí pro proudové hustoty j , které nabývají hodnot vyšších než je hodnota výměnné proudové hustoty j_0 . Obecně, aktivační ztráty V_{act} je možné redukovat využitím porézních elektrod, také využitím efektivnějšího katalyzátoru a zvýšením výměnné proudové hustoty, což vede ke zvýšení hodnoty takzvaného koeficientu aktivity [37]. Aktivační ztráty V_{act} palivového článku lze získat i na základě empirického vyjádření pomocí následujícího vyjádření [74]

$$V_{act} = -\xi_1 - T [\xi_2 + \xi_3 \cdot \ln(c_{O_2}) + \xi_4 \cdot \ln(I_{fc})], \quad (6.14)$$

kde ξ_i představují empirické koeficienty aktivačních ztrát palivového článku ($i=1, 2, 3$ a 4), c_{O_2} je koncentrace kyslíku na katodovém rozhraní membrána-plyn ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$), jež je závislá na parciálním tlaku kyslíku a provozní teplotě palivového článku [39, 74], a I_{fc} je proud palivového článku (A). Podrobnější aplikace empirického vyjádření (6.14) je popsána v podkapitole 6.4.

6.3.2.2 Ohmické ztráty

Ohmické ztráty palivového článku (6.15) lze jednoduše vyjádřit pomocí proudu a vnitřního odporu R_{int} uvažovaného článku.

$$V_{ohm} = I_{fc} \cdot R_{int}, \quad (6.15)$$

kde V_{ohm} představují ohmické ztráty palivového článku (V) a R_{int} je vnitřní odpor palivového článku (Ω). Podle [39, 74] vnitřní odpor palivového článku představuje součet odporů jednotlivých komponent článku a lze jej vyjádřit jako (6.16).

$$R_{int} = R_{proton} + R_{electron}, \quad (6.16)$$

kde R_{proton} odpovídá odporu polymerní membrány (Ω) a $R_{electron}$ představuje ekvivalentní odpor pro tok elektronů a obvykle zahrnuje i odpor kontaktů (Ω). Obecně

je možné říci, že odpor polymerní membrány respektuje dynamické změny v palivovém článku a ekvivalentní odpor pro tok elektronů bývá uvažován jako konstantní [74]. Odpor polymerní membrány lze stanovit podle (6.17) s využitím (6.18).

$$R_{proton} = \frac{\rho_M \cdot l}{A}, \quad (6.17)$$

kde ρ_M je specifická rezistivita membrány ($\Omega \cdot \text{cm}$), l je tloušťka polymerové membrány (cm), A je aktivní plocha jednoho samostatného palivového článku (cm^2). Odpor R_{proton} respektuje dynamické změny, jelikož rezistivita ρ_M je stanovena pomocí funkce, zohledňující aktuální provozní teplotu palivového článku, samotný typ a vlastnosti použité membrány, obsah vody, řeší i stupeň hydratace membrány, resp. proudovou hustotu. V matematických simulacích palivových článků, které mají membránu z nafionu se využívá následující empirické vyjádření [38, 39, 74, 75]

$$\rho_M = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{fc}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{fc}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\Psi - 0.634 - 3 \left(\frac{I_{fc}}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]}, \quad (6.18)$$

kde Ψ je polo-empirický parametr představující efektivní obsah vody membrány. Polo-empirický parametr v ideálním případě, tj. relativní hydratace $RH = 100\%$ membrány, může dosahovat hodnoty 14. V případech, kdy se jedná o supersaturované stavy dosahuje parametr hodnoty až 22 nebo 23 [39, 69, 74].

6.3.2.3 Koncentrační ztráty

Koncentrační ztráty, někdy také ztráty způsobené přepravou či transportem hmoty [72], se nejčastěji vyjadřují pomocí Fickova zákona [65, 73], Stefan-Maxwellovy rovnice či modelu prašného plynu (DGM) [65]. Transport reaktantů k povrchu elektrody (či katalyzátoru) je limitován difúzí v pórech a rychlostí jakou jsou reaktanty spotřebovávány. Koncentrační ztráty palivového článku je možné vyjádřit pomocí následujícího vztahu [37, 40, 41]

$$V_{con} = -\frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_L} \right), \quad (6.19)$$

kde J je aktuální proudová hustota ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) a J_L je limitní proudová hustota ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$). Limitní proudovou hustotu a aktuální proudovou hustotu lze vyjádřit dle [73]

$$J_L = \frac{n \cdot F \cdot D \cdot C_b}{\delta}, \quad (6.20)$$

kde D je difúzní koeficient ($\text{dm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) definující schopnost látky difundovat daným prostředím, δ je tloušťka difúzní vrstvy (cm) a C_b je molární objemová koncentrace reaktantů uvnitř elektrody ($\text{mol}^2 \cdot \text{dm}^{-3}$).

$$J = \frac{n \cdot F \cdot D \cdot (C_b - C_s)}{\delta}, \quad (6.21)$$

kde C_s je molární objemová koncentrace reaktantů na povrchu elektrody ($\text{mol}^2 \cdot \text{dm}^{-3}$). Matematickou úpravou předchozích tří rovnic (6.19), (6.20), (6.21) se získá následující vyjádření koncentračních ztrát [73]

$$V_{con} = -\frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \frac{C_s}{C_b} \quad (6.22)$$

V oblasti vysokých proudových hustot jsou výkon či napětí článku limitovány efektem transportu reaktantů a vyčerpáním reakčních složek na elektrodě [65], jelikož rychlost spotřeby reaktantů je vyšší, než rychlost s jakou mohou být dodávány [73]. Navíc produkovaná voda se hromadí rychleji, než může být odváděna. Při reálném provozu palivového článku může vyšší ztráty způsobit skutečnost, že je vodík dodáván prostřednictvím reforméru. Z pohledu dodávaného množství vodíku, pak může dojít k situaci, kdy aktuální požadavek na dodávku elektrické energie bude převyšovat reálně dodávané nižší množství. Vlivem probíhajících reakcí dojde k mírnému snížení koncentrace vodíku, respektive ke snížení parciálního tlaku. V případě, že kyslík nebude brán ve své čisté podobě, ale využije se kyslíku ze vzduchu, může také dojít k navýšení koncentračních ztrát. Jelikož vzduch obsahuje nejvíce dusíku, může dusík efektivně blokovat další přísun kyslíku [72].

6.3.3 Parciální tlaky reaktantů v PEMFC

Termodynamické děje konkrétního plynu se dají vyjádřit pomocí aplikace stavové rovnice ideálního plynu, která má následující tvar

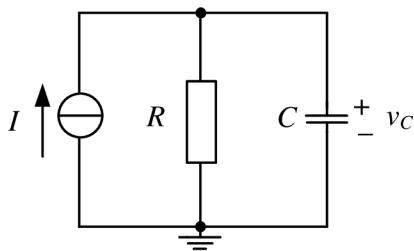
$$p \cdot V_m = R \cdot T, \quad (6.23)$$

kde V_m molární objem ($\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$). Pomocí zákona pro ideální plyn (6.23) je možné vyjádřit elektrochemický popis změny parciálního tlaku určitého reaktantu x v následujícím tvaru

$$\frac{V}{R \cdot T} \frac{dp_x}{dt} = q_x^{in} - q_x^{out} - q_x^r, \quad (6.24)$$

kde V je objem daného kanálu palivového článku (dm^3), dp_x představuje změnu tlaku reaktantu x (atm), dt představuje změnu času (s), q_x^{in} je vstupní molární tok daného reaktantu x ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$), q_x^{out} je výstupní molární tok daného reaktantu x ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$) a q_x^r je reagující molární tok daného reaktantu x ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$).

Popsat a modelovat změnu parciálních tlaků jednotlivých reaktantů palivového článku lze také pomocí elektrického obvodu, který znázorňuje Obr. 6.9 [76].



Obr. 6.9: Ekvivalentní elektrický obvod parciálních tlaků jednotlivých reaktantů v palivovém článku (modifikováno z [76])

Elektrický obvod na Obr. 6.9 [76] musí představovat opravdu ekvivalentní obvod vyjadřující závislosti popsané rovnicí (6.24). V Tab. 6.4 [76] je popsána ekvivalence mezi chemickým vyjádřením dle rovnice (6.34) a elektrickým vyjádřením dle Obr. 6.9 [76], jež popisují změnu parciálních tlaků reaktantů.

Tab. 6.4: Ekvivalence mezi chemickým a elektrickým vyjádřením popisující změnu parciálních tlaků jednotlivých reaktantů v PEMFC [76]

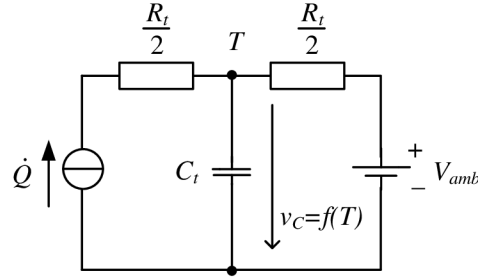
Chemický model	Elektrický model	Stanovení ekvivalence
$\frac{V}{R \cdot T}$	C	geometrie \Rightarrow kapacitor
$\frac{dp_x}{dt}$	$\frac{dV}{dt}$	tlak \Rightarrow napětí
Q_x^{in}	I	molární tok \Rightarrow proudový zdroj
$\frac{1}{k_x}$	R	konstanta \Rightarrow odpor

6.3.4 Teplota PEMFC

Teplota článku představuje velmi charakteristický parametr, který je nezbytný pro jeho simulaci. I když se řada odborných publikací zabývá dynamickým chováním PEMFC, často dochází k zavedení zjednodušujících předpokladů a teplota článku je uvažována jako konstantní. Tato vyšetřování jsou postavena buď na vyjádření změny parciálních tlaků jednotlivých reaktantů, jako například v [31], nebo se využije ekvivalentního elektrického obvodu z Obr. 3.1 [39]. Ten v sobě ovšem změnu teploty nezahrnuje. Změna teploty PEMFC je dle [42] způsobená výkonem, jež je spotřebovaný aktivačními, ohmickými a koncentračními ztrátami. Dále se v [42] uvádí, že tyto tepelné výkonové ztráty většinou probíhají konvencí a zjednodušeně je lze vyjádřit následující rovnicí

$$\dot{Q} = (E_{Nernst} - V_{fc}) I_{fc}, \quad (6.25)$$

kde \dot{Q} jsou tepelné výkonové ztráty (W). Obdobně jako u parciálních tlaků dle Obr. 6.9 [76], tak i popis tepelného chování PEMFC je možné vyjádřit pomocí ekvivalentního elektrického obvodu naznačeného na Obr. 6.10 [42].



Obr. 6.10: Ekvivalentní elektrický obvod charakterizující termodynamické vlastnosti uvnitř palivového článku (modifikováno z [42])

Na Obr. 6.10 [42] napětí V_{amb} představuje teplotu okolí a napětí v_c představuje celkovou teplotu palivového článku. Mezi termodynamickým a elektrickým vyjádřením se předpokládá jejich vzájemná ekvivalence, jež konkretizuje Tab. 6.5 [42].

Tab. 6.5: Ekvivalence termodynamického a elektrického vyjádření PEMFC [42]

Termodynamický model	Elektrický model
napětí v_c	teplota palivového článku T
napětí V_{amb}	teplota okolí T_a
kapacita C	tepelná kapacita C_t
proud I	uložený tepelný výkon uložený \dot{Q}_s
odpor R	tepelný odpor R_t
$I = C \frac{dv_c}{dt}$	$\dot{Q}_s = C_t \frac{dT}{dt}$

Další možností jak determinovat vývoj teploty PEMFC v čase, je s pomocí empiricky stanovených vztahů. Vyjádření teploty musí být komplexní a platné pro různá zatížení PEMFC. Ukázkou takového vyjádření přináší [77] a má následující podobu

$$T = T_x + (T_x - T_{rt} + T_{ic} \cdot I_{fc}) \left(1 - e^{-\frac{t \cdot I_{fc}}{T_{it}}}\right), \quad (6.26)$$

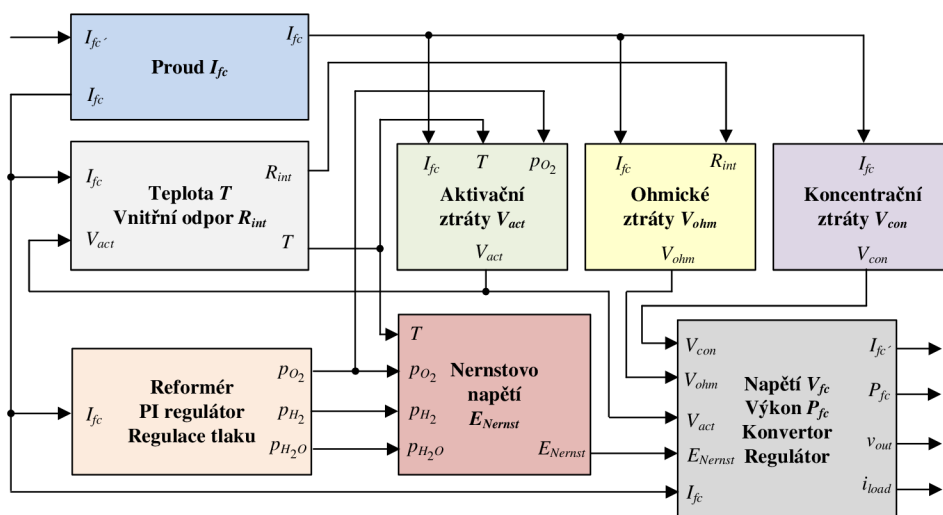
kde T_x , T_{rt} , T_{ic} a T_{it} jsou empiricky stanovené parametry. Vhodnější je však řešení, které vychází ze znalosti napěťových ztrát. Podle [30] lze celkovou tepelnou energetickou bilanci vzduchem chlazeného PEMFC vyjádřit jako

$$\frac{dT}{dt} = \frac{N_0 \cdot I_{fc}^2 (R_{act} + R_{int})}{C_t} - \frac{(T - T_a)}{C_t \cdot R_t}, \quad (6.27)$$

kde dT představuje změnu teploty palivového článku (K), R_{act} je odpor aktivačních ztrát palivového článku (Ω), C_t je tepelná kapacita palivového článku ($J \cdot K^{-1}$), T_a je teplota okolí (K) a R_t je absolutní tepelný odpor palivového článku ($K \cdot W^{-1}$). Konfrontací rovnic (6.25) a (6.27), lze usoudit, že ve vyjádření (6.27) není uvažován tepelný příspěvek způsobený koncentračními ztrátami, které nelze opomíjet.

6.4 Nový komplexní model PEMFC

Matematická simulace palivových článků představuje velmi rozsáhlou víceoborovou problematiku. Jednotlivé matematické modely jsou proto odlišné a ukazují různé technické přístupy a řešení. Tyto přístupy mohou jednak odlišně respektovat fyzikální a chemické závislosti nebo mohou obsahovat několik dalších zjednodušujících předpokladů. Všechny přístupy jsou závislé na skutečnosti, jaké vstupní parametry daný matematický model uvažuje, respektive jaké výstupní parametry jsou od modelu očekávány a požadovány. Tyto okolnosti ovlivní samotný přístup matematické definice modelu se zachováním dostatečné přesnosti získaných výsledků. Na druhou stranu však existují odborné publikace s odlišnými výzkumnými cíli, které se zabývají nízkoteplotními palivovými články. Následující Obr. 6.11 [35] ukazuje blokové uspořádání nově vytvořeného dynamického modelu nízkoteplotního palivového článku typu PEMFC, jež bylo autorem publikováno v [35].



Obr. 6.11: Blokové uspořádání nového komplexního modelu PEMFC [35]

Nový model PEMFC je vytvořený v MATLAB[®] a v MATLAB[®]/Simulink. Modelovaný PEMFC je složen z 80-ti identických a vzduchem chlazených palivových článků, které využívají polymerní membránu Nafion - 117. Díky sériovému propojení jednotlivých článků je při nominální provozní teplotě $T_n = 343,15$ K dosaženo celkového elektrického výkonu téměř 2,0 kW. Popis je koncipovaný takovým způsobem, aby umožňoval analýzu elektrických a neelektrických veličin v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Vytvořený model představuje zdokonalené řešení vycházející z validovaných modelů PEMFC, eliminuje ovšem hlavní nedostatky těchto modelů. Model využívá změny jednotlivých parciálních tlaků reaktantů a respektuje vliv všech napěťových ztrát, tj. aktivačních ztrát, ohmických ztrát a koncentračních ztrát. Dále uvažuje vliv změny vnitřního odporu v závislosti na změnách proudového zatížení a teploty. Zahrnuje také změnu samotné provozní teploty, jež navíc zohledňuje vliv všech základních napěťových ztrát a konvenci tepla do okolí.

K modelu PEMFC je dále implementován model reforméru zohledňující skutečnost, že potřebné palivo pro PEMFC se vyrábí ze zemního plynu. Vhodná implementace umožňuje řízení molárního toku vodíku $q_{H_2}^{in}$ a kyslíku $q_{O_2}^{in}$, a to v závislosti na aktuálním výkonu PEMFC. Výstupní napětí PEMFC není konstantní, proto je model PEMFC doplněn o model snižujícího DC/DC konvertoru, který je řízen pomocí regulátoru a který udržuje napětí 24 V DC. Využití konvertoru přispívá ke komplexnímu využití modelu jako celku v rámci budoucích simulací hybridního systému.

Následující část práce se věnuje podrobnému popisu a konkretizaci jednotlivých vstupních parametrů potřebných pro tvorbu nového matematického modelu PEMFC.

6.4.1 Stanovení aktivačních ztrát

Vzhledem k tomu, že vytvořený matematický model PEMFC využívá membránu s označením Nafion - 117, jsou i aktivační ztráty V_{act} stanoveny pro obdobný typ palivových článků. Konkrétně [74] přináší porovnání publikovaných a verifikovaných koeficientů ξ_1 až ξ_4 a snaží se o modifikaci a zobecnění podmínek plynoucí pro ustálený stav elektrochemického modelu, jež byly specifikovány pro palivové články Ballard. Jednotlivé empirické koeficienty z rovnice (6.14) jsou definovány jako následující závislosti [41, 74]

$$\xi_1 = -\frac{\Delta G_{ec}}{2 \cdot F} - \frac{\Delta G_e}{\alpha_c \cdot n \cdot F}, \quad (6.28)$$

kde ΔG_{ec} je volná aktivační energie chemisorpce na anodě ($J \cdot mol^{-1}$), ΔG_e je aktivační energie na katodě ($J \cdot mol^{-1}$) a α_c je koeficient přenosu náboje na katodě (-). Aktivační energie ΔG_{ec} představuje zpočátku neznámý chemický parametr reakcí [74].

$$\begin{aligned} \xi_2 = & \frac{R}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \ln \left[n \cdot F \cdot A \cdot k_c^0 (c_{H^+})^{(1-\alpha_c)} (c_{H_2O^+})^{\alpha_c} \right] + \\ & + \frac{R}{2 \cdot F} \ln \left[4 \cdot F \cdot A \cdot k_a^0 (c_{H_2}) \right], \end{aligned} \quad (6.29)$$

kde k_c^0 je rychlostní konstanta katodové reakce ($cm \cdot s^{-1}$), c_{H^+} je koncentrace protonů na katodovém rozhraní membrána-plyn ($mol \cdot cm^{-3}$), $c_{H_2O^+}$ je koncentrace vody na katodovém rozhraní membrána-plyn ($mol \cdot cm^{-3}$), k_a^0 je rychlostní konstanta anodové reakce ($cm \cdot s^{-1}$) a c_{H_2} je koncentrace vodíku v kapalně fázi na anodovém rozhraní membrána-plyn ($mol \cdot cm^{-3}$). Aktivační energie ΔG_{ec} , tak i koeficient k^0 představují zpočátku neznámé chemické parametry reakcí. Zatímco aktivní plochu, teplotu článku a koncentraci vodíku c_{H_2} lze kvantifikovat pro konkrétní simulační výpočet [74]. Zbývající koeficienty nutné pro kompletní vyčíslení rovnice (6.14) jsou stanoveny dle

$$\xi_3 = \frac{R(1 - \alpha_c)}{\alpha_c \cdot n \cdot F}. \quad (6.30)$$

respektive jako

$$\xi_4 = -\frac{R}{2 \cdot F} - \frac{R}{\alpha_c \cdot n \cdot F}, \quad (6.31)$$

Konkrétně v [75] je pro různé hodnoty koeficientů ξ_1 až ξ_4 demonstrována míra jejich nevhodnosti, a to na základě generované chybovosti matematického modelu PEMFC. Nový model PEMFC využívá pro určení aktivačních ztrát rovnice (6.28), (6.29), (6.30) a (6.31), nebo také výsledky uvedené v [74]. Koncentrace kyslíku c_{O_2} v rovnici (6.14) je determinována dle [41, 69, 70], a to na základě Henryho zákona či následujícího semiempirického vztahu pro PEMFC s nafion membránou

$$c_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \exp - \frac{498}{T}}. \quad (6.32)$$

Přehled jednotlivých parametrů aplikovaných na nový model uvádí Tab. 6.7.

6.4.2 Stanovení ohmických ztrát

Vytvořený matematický model PEMFC využívá membránu s označením Nafion - 117 s ekvivalentní hmotností $EW = 1.100$. Významným faktorem pro využití nafion membrány pro matematické simulace je skutečnost, že existuje řada publikací, které přináší experimentální vyjádření vnitřního odporu a vodivosti této membrány a že je membrána nafion u PEMFC palivových článků poměrně rozšířená [74]. Lze se setkat i s tím, že řada publikací zavádí odlišné názvosloví či charakteristické parametry membrány. Komerčně je nafion dostupný v několika tzv. ekvivalentních hmotnostech (EW), které představují počet gramů suchého nafionu na jeden mol sulfonové kyseliny [66]. Parametry membrány jsou uvedeny v Tab. 6.6 [66, 74], kde jsou představeny i další alternativy Nafion membrány.

Tab. 6.6: Fyzikální parametry Nafion membrány s $EW = 1.100$ (při $t = 50$ °C a $RH = 50$ %) [66, 74]

Označení membrány	Typická tloušťka (μm / mil)	Plošná hmotnost ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
Nafion - 112	51 / 2,0	100
Nafion - 1135	89 / 3,5	190
Nafion - 115	127 / 5,0	250
Nafion - 117	178 / 7,0	360

Membrána Nafion 117 využívá polymer s ekvivalentní hmotností 1.100 a má tloušťku 7 mil (platí, že 1 mil = 1/1.000 palce = 25,4 μm) [66]. Další parametry této membrány jsou v Tab. 6.6 [66, 74] a jsou představeny i další alternativy Nafion membrány.

Pro stanovení ohmických ztrát palivového článku se využijí rovnice (6.15) a (6.16), případně aplikují rovnice určené přímo pro naftion membránu (6.17) a (6.18). Z rovnice (6.18) je zřejmé, že je-li provozní teplota palivového článku, provozovaného naprázdno (tj. $I_{fc} = 0$ A), rovna 303 K, tak hodnotu specifické rezistivity membrány pro tento provozní stav je možné vyjádřit jako

$$\rho_{M(OC,303)} = \frac{181,6}{\Psi - 0,634}. \quad (6.33)$$

Podle [74] exponenciální funkce ve jmenovateli rovnice (6.18) představuje korekci hodnoty specifické rezistivity pro provozní stavy palivového článku, kdy je jeho teplota odlišná od teploty 303 K. Ostatní části rovnice (6.18) představují empirické korekce rezistivity respektující vliv průměrného obsahu vody, proudové hustoty a dále znovu teploty.

Vytvořený model PEMFC pro stanovení ohmických ztrát uvažuje supersaturovaný stav membrány, proto je parametr Ψ , představující efektivní obsah vody, stanoven dle [39]. Aktivní plocha jednoho samostatného palivového článku je vyčíslena dle [38,74] a tloušťka polymerové membrány vychází z Tab. 6.6 [66,74]. Hodnota ekvivalentního odporu kontaktů je stanovena podle [38]. Přehled jednotlivých parametrů implementovaných v modelu PEMFC je v Tab. 6.7.

6.4.3 Stanovení koncentračních ztrát

Pro stanovení koncentračních ztrát využívá matematický model PEMFC vztahu (6.19), když aktuální proudová hustota je determinována pomocí proudu článku a aktivní plochy. Limitní proudová hustota je stanovena podle [69]. Další parametry potřebné k modelování průběhu koncentračních ztrát jsou uvedeny v Tab. 6.7.

6.4.4 Stanovení parciálních tlaků a jejich regulace

Obecně lze vyjádřit, že molární tok q_x představuje časovou změnu počtu molů n_x v daném kanále [78]. Podle [76] je výstupní molární tok q_x^{out} funkcí proudu palivového článku a vstupního molární toku q_x^{in} . Rovnice (6.24) se upraví následovně

$$\frac{V}{R \cdot T} \frac{dp_x}{dt} = q_x^{in} - k_x \cdot p_x - q_x^r, \quad (6.34)$$

kde k_x je molární konstanta reaktantu x ($\text{kmol} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). V případě, že parciální tlak daného reaktantu x není modelován pomocí ekvivalentního elektrického obvodu z Obr. 6.9 [76], bude nezbytné provést takové matematické úpravy rovnice (6.34), jež by vedly na přímé vyjádření parciálního tlaku p_x . Rovnice (6.34) se nejprve upraví do podoby

$$\frac{V}{R \cdot T} \frac{dp_x}{dt} + k_x \cdot p_x = q_x^{in} - q_x^r \quad (6.35)$$

a následně se na takto upravenou rovnici (6.35) aplikuje Laplaceova transformace

$$\left(\frac{V}{k_x \cdot R \cdot T} s + 1\right) p_x(s) = \frac{1}{k_x} (q_x^{in} - q_x^r), \quad (6.36)$$

kde s představuje komplexní nezávislou proměnnou Laplaceovi transformace.

$$p_x = \frac{1/k_x}{1 + \tau_x \cdot s} (q_x^{in} - q_x^r) \quad (6.37)$$

kde τ_x je časová konstanta daného reaktantu x (s). Podle [69] existuje lineární závislost mezi parciálním tlakem p_x a molárním tokem q_x

$$k_x = \frac{q_x}{p_x}, \quad (6.38)$$

kde q_x představuje molární tok daného reaktantu x ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$), vyjádřený jako $q_x^{in} - q_x^{out} - q_x^r$. Pro vyjádření časové konstanty τ_x platí

$$\tau_x = \frac{V}{k_x \cdot R \cdot T}. \quad (6.39)$$

Jednotlivé vztahy představují obecná vyjádření, která se aplikují pro vyjádření konkrétních parciálních tlaků, tj. vodíku, kyslíku a vody [60, 79].

6.4.4.1 Parciální tlak vodíku

Pro vyjádření parciálního tlaku vodíku platí následující vztahy a toto konkrétní značení

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{R \cdot T}{V_a} q_{H_2} \quad (6.40)$$

a tomu podrobnější vyjádření

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{R \cdot T}{V_a} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r), \quad (6.41)$$

kde dp_{H_2} je změna parciálního tlaku vodíku (atm), V_a je objem anodového kanálu (dm^3), $q_{H_2}^{in}$ je vstupní molární tok vodíku ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$), $q_{H_2}^{out}$ je výstupní molární tok vodíku ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$) a $q_{H_2}^r$ je reagující molární tok vodíku ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$). Je nutné poznamenat, že u malých palivových článků může být podle [77] výstupní molární tok vodíku $q_{H_2}^{out}$ uvažován jako nulový. Uvedené by znamenalo, že také dojde k adekvátní transformaci matematického vyjádření tlaku vodíku.

$$p_{H_2} = \frac{1/k_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} \cdot s} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^r), \quad (6.42)$$

kde k_{H_2} je molární konstanta vodíku ($\text{kmol} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) a τ_{H_2} je časová konstanta pro vodík (s). Současně pro molární konstantu vodíku k_{H_2} platí [69]

$$k_{H_2} = \frac{q_{H_2}}{p_{H_2}}, \quad (6.43)$$

kde q_{H_2} představuje molární tok vodíku ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$). Časová konstanta τ_{H_2} je stanovena z ustáleného stavu palivového článku a závisí na objemu anodového kanálu, univerzální plynové konstantě, absolutní teplotě a molární konstantě k_{H_2} , což lze vyjádřit následovně [60]

$$\tau_{H_2} = \frac{V_a}{k_{H_2} \cdot R \cdot T}, \quad (6.44)$$

V rovnicích (6.40), (6.41) a (6.44) je univerzální plynová konstanta v $\text{atm}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [77]. Výsledný vstupní molární tok vodíku se odvíjí od molárního toku vodíku, který se účastní reakcí a který je možno vyjádřit pomocí následujícího vztahu [69]

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 \cdot I_{fc}}{2 \cdot F}. \quad (6.45)$$

6.4.4.2 Parciální tlak kyslíku

Pro vyjádření parciálního tlaku kyslíku platí následující

$$\frac{dp_{O_2}}{dt} = \frac{R \cdot T}{V_c} (q_{O_2}^{in} - q_{O_2}^{out} - q_{O_2}^r), \quad (6.46)$$

kde dp_{O_2} je změna parciálního tlaku kyslíku (atm), V_c je objem katodového kanálu (dm^3), $q_{O_2}^{in}$ je vstupní molární tok kyslíku ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$), $q_{O_2}^{out}$ je výstupní molární tok kyslíku ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$) a $q_{O_2}^r$ je reagující molární tok kyslíku ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$)

$$p_{O_2} = \frac{1/k_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} \cdot s} (q_{O_2}^{in} - q_{O_2}^r), \quad (6.47)$$

kde p_{O_2} je parciální tlak kyslíku (atm), k_{O_2} je molární konstanta kyslíku ($\text{kmol}\cdot\text{atm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) a τ_{O_2} je časová konstanta pro kyslík (s), pro kterou platí rovnice [60]

$$\tau_{O_2} = \frac{V_c}{k_{O_2} \cdot R \cdot T}. \quad (6.48)$$

V rovnicích (6.46) a (6.48) je univerzální plynová konstanta v $\text{atm}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [77]. Vstupní molární tok kyslíku se odvíjí od molárního toku vodíku, který se účastní reakcí a který lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu [69]

$$q_{O_2}^r = \frac{N_0 \cdot I_{fc}}{4 \cdot F}, \quad (6.49)$$

Výsledný vstupní molární tok kyslíku se stanoví pomocí vstupního molárního toku vodíku a poměru jejich molárních toků [60]

$$q_{O_2}^{in} = \frac{q_{H_2}^{in}}{r_{H-O}}, \quad (6.50)$$

kde r_{H-O} je poměr molárních toků vodík-kyslík (-).

6.4.4.3 Parciální tlak vody

Obdobně i vyjádření parciálního tlaku vody užívá ekvivalentních rovnic s příslušným značením

$$\frac{dp_{H_2O}}{dt} = \frac{R \cdot T}{V_a} (q_{H_2O}^{in} - q_{H_2O}^{out} - q_{H_2O}^r), \quad (6.51)$$

kde dp_{H_2O} je změna parciálního tlaku vodíku (atm), $q_{H_2O}^{in}$ je vstupní molární tok vody ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$), $q_{H_2O}^{out}$ je výstupní molární tok vody ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$) a $q_{H_2O}^r$ je reagující molární tok vody ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$p_{H_2O} = \frac{1/k_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O} \cdot s} (q_{H_2O}^{in} - q_{H_2O}^r), \quad (6.52)$$

kde p_{H_2O} je parciální tlak vody (atm), k_{H_2O} je molární konstanta vody ($\text{kmol} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) a τ_{H_2O} je časová konstanta pro vodu (s), pro kterou platí vyjádření

$$\tau_{H_2O} = \frac{V_a}{k_{H_2O} \cdot R \cdot T}. \quad (6.53)$$

Univerzální plynová konstanta v rovnicích (6.51) a (6.53) je v $\text{atm} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [77]. Matematický popis, který vyjadřuje parciální tlaky a změnu parciálních tlaků je implementován do nového matematického modelu PEMFC. Jednotlivé hodnoty z tohoto popisu jsou uvažovány jako vstupní parametry pro matematický model a jsou uvedeny v Tab. 6.7. Parciální tlak vody je ovšem v realizovaných simulacích konstantní, tudíž v provedených simulacích nejsou respektovány jeho případné dynamické změny.

6.4.4.4 Regulace

Je nutné si uvědomit, že výrazné rozdíly mezi parciálním tlakem vodíku a parciálním tlakem kyslíku mohou způsobit těžké poškození polymerní membrány [41]. Koncepce regulace tlaku je navržena podle [42], kde je výstupní tlak udržován na požadované hodnotě p_{ref} (atm) podle referenčního toku q_x^{ref} . Regulaci tlaku popisuje následující vyjádření a jednotlivé tlaky jsou regulovány na hodnotu 1,0 atm. Zjednodušeně lze referenční tok chápat jako

$$q_x^{ref} = q_x^{in} - q_x^{out}, \quad (6.54)$$

kde q_x^{ref} je referenční množství molárního toku daného reaktantu x pro konkrétní zatížení palivového článku ($\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$). Podle [70] je výstupní molární tok reaktantů q_x^{out} roven

$$q_x^{out} = k_x \cdot (p_x - p_{amb}), \quad (6.55)$$

kde p_{amb} je tlak okolí (atm). Při provozu palivového článku je důležité i vysoké využití jednotlivých reaktantů, čímž lze dosáhnout nižších provozních nákladů a příznivějších

požadavků na kompresor [80]. Dle [80] platí

$$U = \frac{q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out}}{q_{H_2}^{in}}, \quad (6.56)$$

kde U je faktor využití vodíku (-). Podle [80] se běžně hodnota faktoru využití U pohybuje v rozmezí od 0,8 do 0,9. Rovnici (6.56) je pak možné zobecnit pro jednotlivé reaktanty

$$U_x = \frac{q_x^{in} - q_x^{out}}{q_x^{in}}, \quad (6.57)$$

kde U_x je faktor využití daného reaktantu x (-). Regulace využívá jednotlivé parciální tlaky p_x , referenčního molárního toku q_x^{ref} a časového zpoždění. Konkrétní hodnoty použitých parametrů jsou uvedeny v Tab. 6.7.

6.4.5 Stanovení teplotní závislosti

Znalost provozní teploty palivového článku a jejího vývoje představuje velmi podstatnou část z celkového vyšetřování, neboť téměř všechny početní vztahy popisující článek mají vazbu právě na jeho teplotu. V matematickém modelu PEMFC se využívá popisu, který vychází z rovnic (6.25), (6.27) a respektuje vyjádření teploty pomocí tepelných výkonů uvažovaných v ekvivalentním elektrickém obvodu na Obr. 6.10 [42]. Celkové tepelné výkonové ztráty \dot{Q} palivového článku, lze pak vyjádřit také ve tvaru

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_a, \quad (6.58)$$

kde \dot{Q}_s představuje tepelný výkon uložený v palivovém článku (W) a \dot{Q}_a představuje tepelné ztráty výkonu do okolí (W). Tepelný výkon uložený v palivovém článku lze dle [42] vyjádřit jako

$$\dot{Q}_s = C_t \frac{dT}{dt} \quad (6.59)$$

a tepelné ztráty výkonu \dot{Q}_a , které konvencí přecházejí do okolí, se vyjádří následovně

$$\dot{Q}_a = \frac{T - T_a}{R_t}. \quad (6.60)$$

Celkové tepelné výkonové ztráty lze uvést v následujícím tvaru, který charakterizuje závislosti z rovnice (6.25)

$$\dot{Q} = N_0 (R_{act} + R_{int} + R_{con}) \cdot I_{fc}^2 \quad (6.61)$$

kde R_{con} představuje odpor koncentračních ztrát palivového článku (Ω) a stanoví se na základě znalosti koncentračních ztrát V_{con} a proudu článku I_{fc} . Jednotlivé hodnoty parametrů charakterizující teplotní chování PEMFC jsou uvedeny v Tab. 6.7.

6.5 Analýza ustáleného stavu PEMFC

Na základě analýzy ustáleného stavu PEMFC se vyšetří výkonové možnosti článku v celé jeho provozní oblasti. Z předešlých rovnic je zřejmé, že funkci palivového článku ovlivňují napěťové ztráty (tj. V_{act} , V_{ohm} a V_{con}) a vysoká proudová hustota a že řízení článků bývá realizováno pomocí regulátorů toků reaktantů. Analýza poslouží ke stanovení I-V charakteristiky článku v závislosti na provozní teplotě T a na velikosti parciálních tlaků jednotlivých reaktantů p_x , jež významně ovlivňují průběh těchto charakteristik, někdy také nazývaných jako polarizační. V Tab. 6.7 jsou uvedeny výchozí parametry, které byly použity pro simulaci PEMFC v jeho ustáleném stavu.

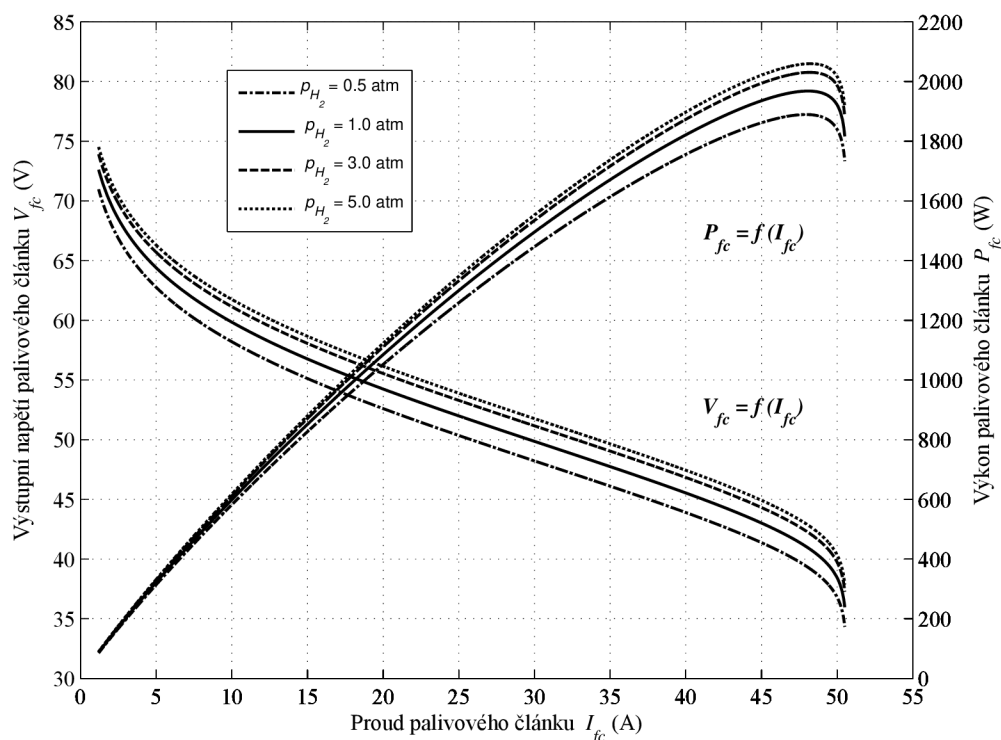
Tab. 6.7: Hodnoty parametrů využitých v novém modelu PEMFC

Parametr	Označení	Velikost	Jednotka
Počet palivových článků v sérii	N_0	80	-
Napětí při standardních podmínkách	E_0	1,229	V
Nominální provozní teplota	T_n	343,15	K
Standardní teplota	T_0	298,15	K
Parciální tlak vody	p_{H_2O}	1,0	atm
Celkový tlak uvnitř palivového článku	p	1,0	atm
Teplota okolí	T_a	298,15	K
Empirický koeficient aktivačních ztrát	ξ_1 [74]	-0,9514	V
Empirický koeficient aktivačních ztrát	ξ_2 [74]	0,00312	V·K ⁻¹
Empirický koeficient aktivačních ztrát	ξ_3 [74]	$7,4 \cdot 10^{-5}$	V·K ⁻¹
Empirický koeficient aktivačních ztrát	ξ_4 [74]	-0,000187	V·K ⁻¹
Ekvivalentní odpor kontaktů	$R_{electron}$ [38, 39]	0,0003	Ω
Limitní proudová hustota	J_L [69]	1.000	mA·cm ⁻²
Molární plynová konstanta	R	8,3145	J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
Faradayova konstanta	F	96485,34	C·mol ⁻¹
Aktivní plocha	A [38, 74]	50,6	cm ²
Tloušťka polymerové membrány	l [38]	$178 \cdot 10^{-4}$	cm
Polo-empirický parametr obsahu vody	Ψ [39]	23,0	-

Hodnota napětí palivového článku při standardních podmínkách uvedená v Tab. 6.7 byla stanovena na základě rovnic (6.8) a (6.9). V úvahu byly brány hodnoty z Tab. 6.3 [61, 67]. Analýza ustáleného stavu PEMFC probíhá na modelu, který neobsahuje modely reformátoru, regulátoru nebo konvertoru, jelikož hlavním sledovaným cílem je stanovit poměry přímo na palivovém článku.

6.5.1 Vliv změny parciálního tlaku

Ustálený stav PEMFC je vyšetřován pro situaci, kdy článek využívá čistého vodíku a kyslíku. Vzhledem k tomu nedochází ke vzniku přídavných ztrát, ke kterým by docházelo v případě přítomnosti dalších plynů, které se však na reakcích nepodílejí. Jejich přítomnost přispívá k velikosti celkového provozního tlaku článku, jelikož celkový tlak je určen součtem jednotlivých parciálních tlaků $\sum p_{H_2}$ přítomných plynů. Následující Obr. 6.12 přináší srovnání jednotlivých V-I charakteristik pro různé hodnoty parciálního tlaku vodíku při konstantní provozní teplotě článku. Ilustruje i výkonové křivky pro uvažované provozní stavy.



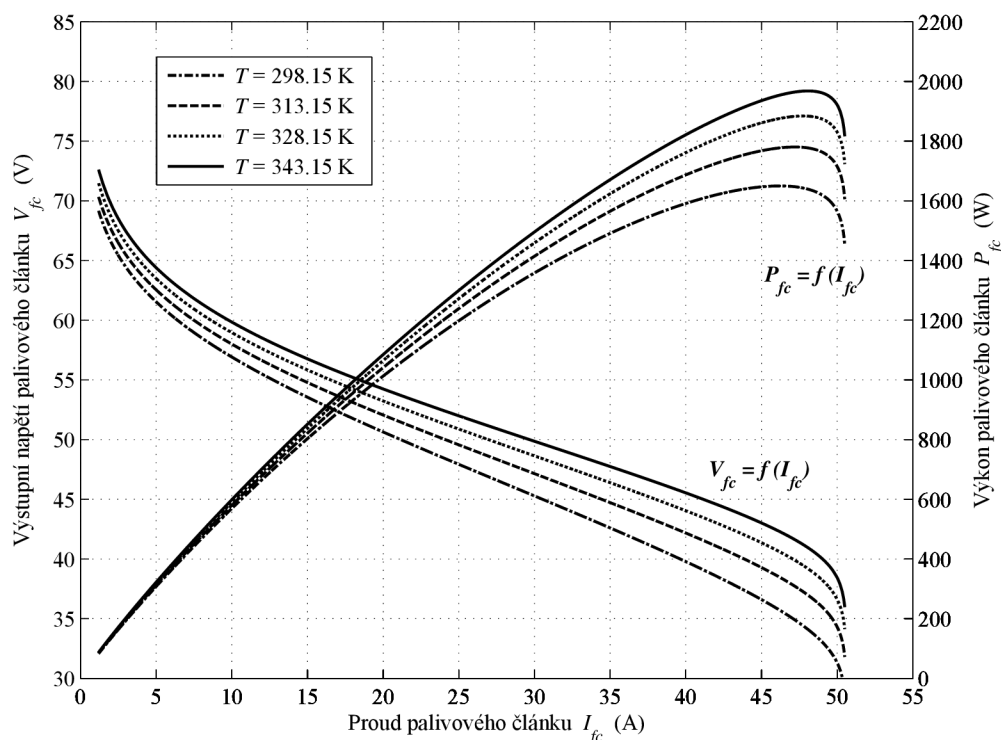
Obr. 6.12: Vliv změny parciálního tlaku vodíku p_{H_2} palivového článku na průběh jeho V-I charakteristiky pro konstantní teplotu $T = 343,15$ K a parciální tlaky $p_{O_2} = 1,0$ atm a $p_{H_2O} = 1,0$ atm

Průběhy z Obr.6.12 demonstrují skutečnost, že pokud je tlak vodíku vyšší než jeho nominální hodnota (tj. $p_{H_2} = 1,0$ atm), tak napětí naprázdno palivového článku mírně vzroste, a to vlivem zvýšení proudové hustoty v palivovém článku [72]. Průběhy výkonů ilustrují jejich charakteristický tvar. Dále průběhy informují, že maximální výkon článku se s rostoucím tlakem vodíku posouvá do oblasti vyšších proudů, a to vlivem intenzifikace přenosu hmoty [71]. Nominálního výkonu článku P_{fcn} je dosaženo při proudu 48,0 A a při tlaku vodíku 1,0 atm. Dojde-li ke zvýšení tlaku vodíku na 3,0 atm je maximální výkon článku dosažen při proudu 48,5 A a dosažený výkon je oproti nominálnímu výkonu přibližně o 3 % vyšší. Vzhledem k tomu, že zvýšení provozního tlaku vede ke zvýšení parciálních tlaků jednotlivých reaktantů, existuje i určitá úměra

mezi rychlostí chemických reakcí a jednotlivými parciálními tlaky reaktantů [71, 72]. Na druhou stranu je nutné si uvědomit, že zvýšení tlaků jednotlivých reaktantů s sebou nese vyšší požadavky na konstrukci palivových článků. Jedná se zejména o zvýšené nároky na těsnění a plynové kanály, prostřednictvím kterých jsou reaktanty do článku distribuovány a které pracují lépe při nižších tlacích. Vysoký tlak pak může zapříčinit vyšší cenu palivového článku jako celku, protože je nutné vyššímu tlaku přizpůsobit i samotnou konstrukci [72].

6.5.2 Vliv změny provozní teploty

Obdobně jako při zvýšení provozního tlaku, i zvýšení provozní teploty má za následek růst napětí článku. Podle rovnice (6.18) je zřejmé, že bude-li uvažována vyšší provozní teplota, dojde k poklesu rezistivity a tím i ke snížení odporu polymerní membrány. K růstu napětí dochází vlivem poklesu vnitřního odporu palivového článku, díky urychlení přenosu hmoty uvnitř článku [72] a v důsledku zvýšení reakčních rychlostí [71]. Následující Obr. 6.13 přináší srovnání jednotlivých V-I charakteristik pro konstantní provozní parciální tlaky reaktantů palivového článku, avšak pro různé hodnoty provozních teplot. Ilustruje i výkonové křivky pro uvažované provozní stavy.



Obr. 6.13: Vliv změny provozní teploty palivového článku na průběh jeho V-I charakteristiky pro konstantní parciální tlaky jednotlivých reaktantů (všechny 1,0 atm)

U palivových článků PEMFC, které jsou provozované v rozmezí teplot 50 °C až 90 °C, je možné uvažovat ekvivalentní odpor pro tok elektronů za konstantní [74].

Průběhy výkonů na Obr. 6.13 ilustrují, že maximální výkon článku se s rostoucí provozní teplotou posouvá do oblasti vyšších proudů, a to vlivem intenzifikace přenosu hmoty [71]. Nominálního výkonu článku se dosahuje při proudu 48,0 A a při provozní teplotě 343,15 K (tj. 70 °C). Dojde-li však ke snížení provozní teploty na 298,15 K (tj. 25 °C) je maximální výkon článku dosažen již při proudu 46,5 A a dosažený výkon je oproti nominálnímu výkonu přibližně o 16 % nižší. Produktem chemických reakcí palivového článku je voda, proto jsou vyšší provozní teploty realizovatelné pro vyšší parciální tlaky jednotlivých reaktantů, kdy dochází k posunutí bodu varu vody. Případný var produkované vody by však kriticky snížil parciální tlak kyslíku, což by vedlo k omezení výkonu článku [72]. Vzhledem k tomu, že provozní teplota simulovaného palivového článku je 70 °C a parciální tlaky jsou uvažovány 1,0 atm, je vliv varu zanedbatelný. Stejně jako vysoké tlaky, tak i vyšší teploty vyžadují pozornost z pohledu zdokonalení konstrukce palivového článku, hlavně z důvodu, aby nedocházelo k poškození a omezení životnosti článku.

6.5.3 Vliv změny koncentrace reaktantů

Na základě znalosti chemických reakcí je možné stanovit teoretické množství plynů, které je nezbytné pro uskutečnění těchto reakcí [62]. V případě, že se nebere v úvahu čistý vodík nebo kyslík, je třeba respektovat vliv změny jejich koncentrace a reálné složení reaktantů. Chemické reakce neprobíhají ideálně, proto se zavádí pojem poměrný obsah látky. Poměr vyjadřuje podíl množství skutečně přítomného plynu a teoretické množství, které je nezbytné pro uskutečnění reakce. Stejně jako měl vrůstající tlak za následek růst napětí článku, podobná situace nastane, bude-li zvyšován poměrný obsah plynů. Čím více bude navyšován poměrný obsah, tím více se napětí článku přiblíží ke své maximální hodnotě [72]. Parciální tlak jednotlivých reaktantů se samozřejmě mění se změnou koncentrace a se složením těchto reaktantů [71]. Pokud plyn bude mít poměrný obsah roven jedné, jedná se o množství, které odpovídá teoreticky nezbytnému množství nutnému pro realizaci reakce. Při jmenovitém zatížení jsou palivové články provozovány s poměrným obsahem vodíku přibližně 1,4 a vzduchu 2,0 [72, 81]. Vliv změny stechiometrie vzduchu blíže popisuje a prezentuje [81].

6.5.4 Vliv hydratace membrány

Vodivost nafion membrány je závislá na množství hydratace (tj. vlhkosti) a může se proto měnit v závislosti na obsahu vody. Hydratace membrány se vyjadřuje prostřednictvím relativní vlhkosti (RH). Vodivost plně hydratované membrány (tj. $RH = 100\%$) je obdobná elektrolytům kapalným. Je-li v membráně přítomna voda, protony tvoří hydroxoniové ionty H_3O^+ (viz. Obr. 6.5 [13]), které transportují protony ve vodní fázi [65]. Samotné zvlhčování membrány probíhá prostřednictvím molekul vody, které jsou unášeny vodíkovými ionty během výměnné iontové reakce [72]. Zvlhčovače jsou

proto důležitá zařízení z pohledu spolehlivosti provozu palivového článku jako celku, protože i malé změny relativní vlhkosti membrány (elektrolytu) mohou vést k velkým změnám napětí palivového článku [82]. Také v případech, kdy článek nepracuje a nedodává energii, musí být membrána stále udržována s určitou relativní vlhkostí. Při provozu článku s nehydratovanou membránou by mohlo dojít k poškození membrány. Potřebné hydratace se dosahuje zvlhčováním reakčních plynů nebo se spoléhá na množství produkované vody na katodové straně článku [65]. Obecně je hydratace membrány závislá na tlaku a teplotě plynů. Pro nízké tlaky je zvlhčení membrány značně závislé na teplotě. Teplejší plyn je schopen pojmout větší množství vody, avšak pro případ nežádoucí kondenzace vodních par, jsou plyny zvlhčovány při teplotě odpovídající teplotě provozní. Palivové články proto nejčastěji pracují s relativní vlhkostí, která odpovídá stavu nasycení nebo je v jeho blízkosti. Proto je i článek konstruován takovým způsobem, aby se tohoto stavu dosáhlo pokud možno právě při jeho provozní teplotě [72]. Pro zvlhčení plynů ve zvlhčovači (z angl. humidifier) se využije chladicí vody palivového článku, a to i bez dalšího přídavného vodního nebo ohřívacího systému. Existují technická řešení, která jsou schopna redukovat velikost systému, případně další spotřebu energie systému [82]. Voda musí být zbavena iontů, aby zůstala nevodivá. V opačné případě by mohlo dojít ke zkratu či vzniku korozních proudů uvnitř palivového článku [83]. V práci je relativní vlhkost membrány respektována rovnicí (6.18), kdy je parametr Ψ roven 23,0.

6.6 Analýza dynamického chování PEMFC

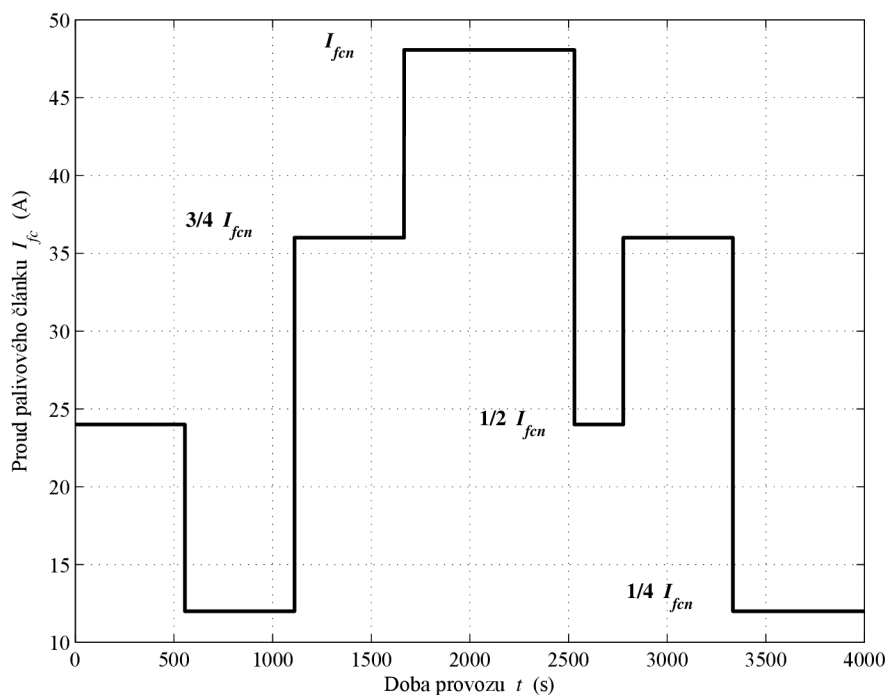
Analýza dynamického chování PEMFC je rozdělena do tří částí, které pak korespondují s konceptem jednotlivých provedených experimentů, při kterých je využito nového modelu PEMFC a které ukazují vývoje jednotlivých elektrických a neelektrických veličin článku v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Pro každou část je vytvořena samostatná testovací sekvence pulzů představující jednotlivá proudová zatížení PEMFC. Výsledky dynamických experimentů autor prezentoval v [35, 58, 59]. Tyto výsledky byly získány využitím modelu, který k popisu vývoje teploty využíval vyjádření (6.27). Autor se nyní pro popis vývoje teploty opírá o vztahy (6.58) až (6.61). Podstata jednotlivých experimentů zůstává zachována, pouze vývoj teploty článku respektuje i teplotní příspěvek způsobený napěťovými koncentračními ztrátami. Výsledky jsou téměř totožné. Výchozí parametry modelu, které řeší dynamické chování článku jsou shodné s Tab. 6.7. Výjimku tvoří teplota článku, která není konstantní, jako tomu bylo v případě analýzy ustáleného stavu v podkapitole 6.6. Teplota je určena podle popisu představeného v podkapitole 6.4. Rovněž parciální tlaky vodíku a kyslíku se nepovažují za neměnné, proto je využito rovnic (6.42)a (6.47). Tab. 6.8 zachycuje další nezbytné parametry pro vyšetření dynamického chování.

Tab. 6.8: Hodnoty jednotlivých parametrů využitých v novém matematickém modelu PEMFC pro vyšetření dynamického chování

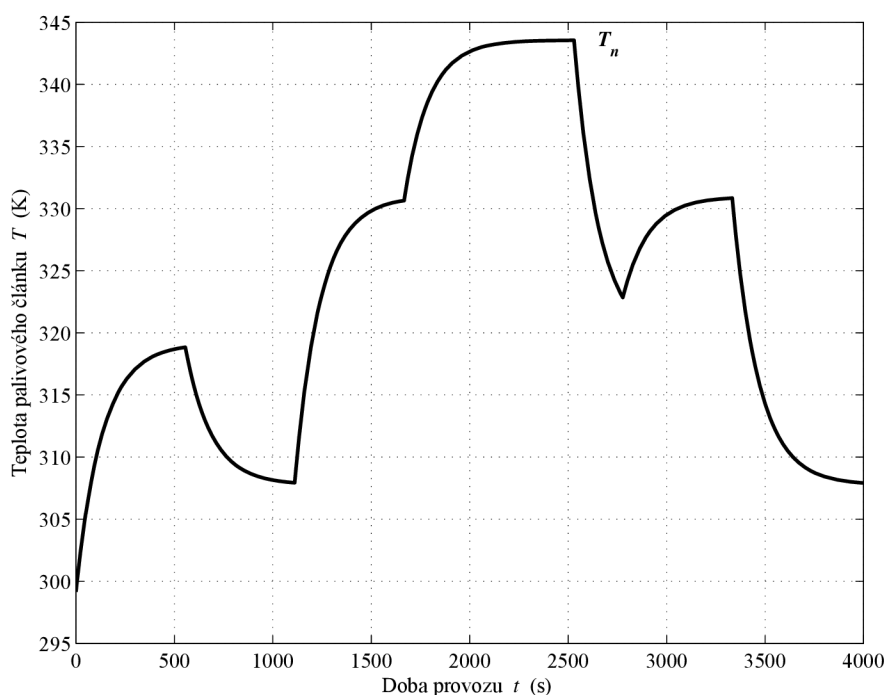
Parametr	Označení	Velikost	Jednotka
Molární konstanta vodíku	k_{H_2}	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$\text{kmol} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Časová konstanta pro vodík	τ_{H_2}	2,46	s
Molární konstanta kyslíku	k_{O_2}	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$\text{kmol} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Časová konstanta pro kyslík	τ_{O_2}	4,92	s
Faktor využití	U [31, 32, 84]	0,8	-
Poměr molárních toků vodík-kyslík	r_{H-O} [31, 84]	1,168	-
Nominální tepelná kapacita	C_{tn}	7.000	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
Nominální absolutní tepelný odpor	R_{tn}	0,0195	$\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

6.6.1 Samostatný model PEMFC - I. část

První část analýzy představuje výsledky simulací, které jsou realizovány pouze na samostatném modelu PEMFC. Simulace neuvažují implementaci žádného dalšího modelu (subsystému), jako jsou například modely reforméru, regulace nebo DC/DC konvertoru. Jelikož nejsou další modely uvažovány, odpovídá zátěžný proud přímo proudu palivového článku I_{fc} . Pro simulaci průběhů výkonu P_{fc} , napětí V_{fc} a teploty T článku je navržen testovací zátěžný proud, který ukazuje Obr. 6.14.

**Obr. 6.14:** Navržená sekvence pulzů a jejich amplitud představující zátěžný proud využitý pro vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC

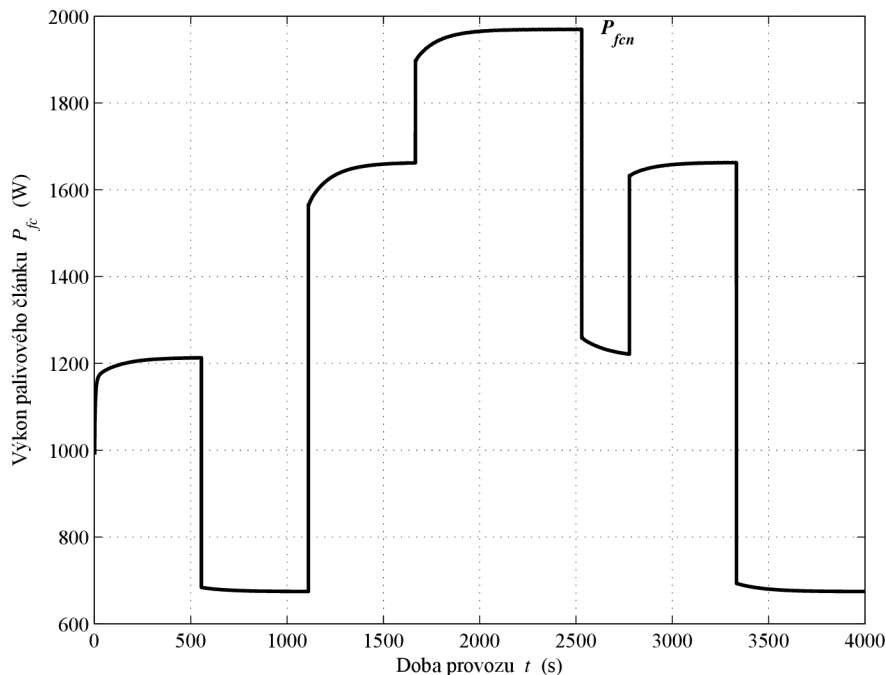
Uvažovaná sekvence pulzů na Obr. 6.14 představuje jednotlivá proudová zatížení PEMFC, která svojí amplitudou odpovídají jednak $\frac{1}{4}I_{fc}$, $\frac{1}{2}I_{fc}$, $\frac{3}{4}I_{fc}$, ale také přímo nominálnímu proudu I_{fcn} . Sekvence pulzů je navržena tak, aby byly respektovány významné a náhlé změny v zatížení. Jsou proto přítomny poklesy a nárůsty odebíraného proudu představující 50% změnu (vztaženo k rozsahu 0 - I_{fc}). Konkrétně v čase 1.100 s je uvažováno zvýšení zatížení, a to z hodnoty 12,0 A na hodnotu 36,0 A. V čase 2.520 s se předpokládá odlehčení z nominální hodnoty 48,0 A na hodnotu 24,0 A. Celková délka sekvence pulzů je volena 4.000 s, což představuje více než hodinový provoz PEMFC. Významné změny zatížení a dlouhá doba provozu korespondují s hlavním účelem vyšetřování, to je analyzovat vývoj zvolených veličin v rámci dlouhého časového intervalu. Obr. 6.15 ukazuje vývoj teploty PEMFC.



Obr. 6.15: Průběh provozní teploty PEMFC pro navržený zátěžný proud určený k vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC

Rychlost růstu či poklesu teploty palivového článku se odvíjí od velikosti proudu palivového článku. Obr. 6.15 ukazuje, že nominální teploty $T_n = 343,15$ K je dosaženo pouze v časovém intervalu od 2.200 s do 2.500 s. V tomto intervalu PEMFC pracuje v ustáleném stavu a dodává do zátěže nominální výkon P_{fcn} . Pokud článek nedosáhne své nominální teploty není schopen dodávat nominální výkon. Třetí, pátý a sedmý pulz na Obr. 6.14 představují situaci, kdy dojde ke snížení odebíraného proudu zátěží. Vzhledem k tomu, že teplotní popis respektuje přestup tepla konvencí do okolí podle rovnice (6.60) je při poklesech proudů zjevné i snížení provozní teploty PEMFC. Pokud by PEMFC pracoval například ve spojení s mikrokogenerační jednotkou, může se teplo produkované provozem PEMFC efektivně využít v tepelném výměníku pro ohřev teplé

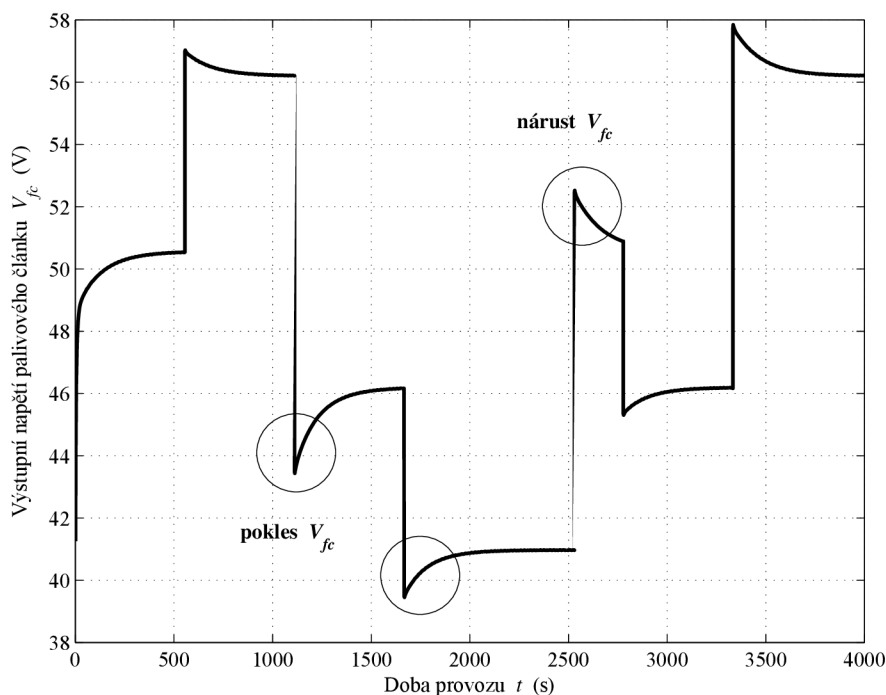
užitkové vody. Následující Obr. 6.16 přináší průběh výkonu PEMFC pro navržený zátěžný proud.



Obr. 6.16: Průběh výkonu PEMFC pro navržený zátěžný proud určený k vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC

Podle Obr. 6.14 je v rozmezí od 1.650 s do 2.520 s požadavek na odběr proudu, který svojí velikostí odpovídá hodnotě nominálního proudu I_{fcn} . Výsledky ustáleného stavu PEMFC na Obr. 6.12 a Obr. 6.13 ukazují, že nominální proud článku je právě $I_{fcn} = 48,0$ A. Následně z Obr. 6.16 je vidět, že intervaly trvání nominálního proudu a nominálního výkonu spolu nekorrespondují. Intervaly jsou odlišné jelikož provozní teplota není ustálena na své nominální hodnotě. Průběh výkonu každopádně obsahuje významnou informaci o výkonových možnostech PEMFC. Samotná křivka je důležitá například pro návrh kogeneračních jednotek, které využívají PEMFC. Ukazuje totiž výkonové chování v čase pro různé provozní podmínky. Změny zátěžného proudu a provozních podmínek obecně vedou ke skutečnosti, že i výstupní napětí palivového článku není neměnné.

Obr. 6.17 zachycuje vývoj napětí PEMFC pro navržený zátěžný proud určený k vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC. Demonstruje skutečnost, že při zvýšení zátěžného proudu dochází k rychlému poklesu napětí. Naproti tomu pokles zatížení, vede k napěťovým nárůstům. Tento pokles nebo nárůst trvá tak dlouho, dokud PEMFC není v ustáleném stavu. Vývoj teploty PEMFC pro různé zátěžné proudy je modelován stejnou funkcí, liší se však svojí limitní hodnotou. Vzhledem k tomu, že změna zatížení je realizována skokově, je ustálený stav odvislý od ustálení provozní teploty PEMFC. Například pátý pulz z Obr. 6.14 představuje pokles zátěž-



Obr. 6.17: Průběh napětí PEMFC pro navržený zátěžný proud

ného proudu. Pokles má délku trvání přibližně 500 s, což je doba za kterou nedojde k ustálení provozní teploty PEMFC, tudíž i napětí či další elektrické veličiny nedosáhnou svého ustáleného stavu.

6.6.2 Model PEMFC, reformér a regulace - II. část

V druhé části analýzy je model PEMFC rozšířen o model reforméru zemního plynu a je implementována regulace tlaků jednotlivých reaktantů p_x . Stejně jako model PEMFC, i modely reforméru a regulace tlaku jsou navrženy v prostředí MATLAB®/Simulink. Popis modelu reforméru je uveden v textu níže. Model regulace tlaku je realizován dle popisu uvedeného v podkapitole 6.4. Výstupní tlak se udržuje na požadované hodnotě p_{ref} , k čemuž se využije parciálních tlaků p_x , referenčního molárního toku q_x^{ref} a časového zpoždění. Experimenty provedené v této části jsou zaměřeny hlavně na analýzu průběhu provozní teploty PEMFC při jeho případných konstrukčních modifikacích. Výsledky ostatních neelektrických veličin PEMFC jsou uvedeny a okomentovány ve třetí části, kdy je navíc implementován DC/DC konvertor. Tato část řeší analýzu tepelného chování PEMFC s ukázkou vlivu na celkový dodávaný výkon P_{fc} .

6.6.2.1 Model reforméru

Reformér představuje zařízení, které má schopnost produkovat vodík pro palivový článek, a to na základě reformace zemního plynu. Reformér ve spojení s palivovým článkem produkuje takové množství vodíku, které zajistí správnou funkci článku. Samotné

množství, které je potřebné nebo spotřebováváno v palivovém článku pak závisí nejen na konkrétní konstrukci článku, ale také na výstupním výkonu. Tomu odpovídají i vstupní a výstupní molární toky jednotlivých reaktantů. Následující rovnice (6.62) představuje jedno z možných matematických vyjádření reforméru.

$$\frac{q_{H_2}^{in}}{q_{meth}} = \frac{CV}{\tau_1 \cdot \tau_2 \cdot s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + 1}, \quad (6.62)$$

kde $q_{H_2}^{in}$ je vstupní molární tok vodíku ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$), q_{meth} je molární tok metanu ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$), CV je konverzní faktor, který představuje poměr molárního množství vodíku a metanu, τ_1 a τ_2 jsou časové konstanty reforméru (s). Tento konkrétní matematický model více přibližuje [32, 84].

Pro řízení molárního toku metanu q_{meth} v reforméru je využito PI regulátoru a referenční hodnoty molárního toku metanu q_{meth}^{ref} . Podle [32] pro molární tok metanu platí, že

$$q_{meth} = \left(K + \frac{K}{\tau \cdot s} \right) (q_{H_2}^{req} - q_{H_2}^{in}), \quad (6.63)$$

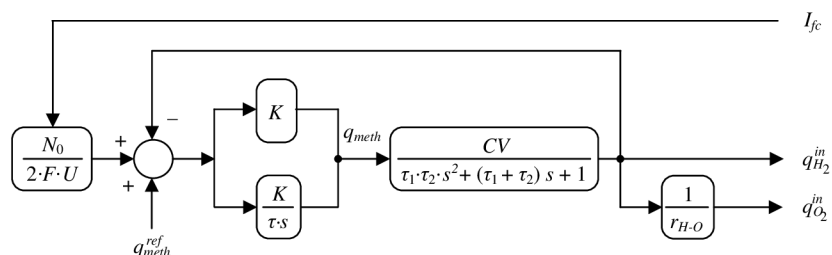
kde K je konstanta PI regulátoru (-), τ je časová konstanta reforméru PI regulátoru (s) a $q_{H_2}^{req}$ je množství molárního toku vodíku pro konkrétní zatížení palivového článku ($\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$). PI regulátor je blíže popsán v [32, 84]. Hodnoty parametrů využitých při tvorbě modelu reforméru, ale také modelu regulace tlaku uvádí Tab. 6.9.

Tab. 6.9: Doplnující parametry PEMFC k provedení tepelných experimentů a hodnoty parametrů využitých pro modely reforméru a regulace tlaků reaktantů

Parametr	Označení	Velikost	Jednotka
Tepelná kapacita	C_t	7.000 ± 2.000	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
Absolutní tepelný odpor	R_t	$0,0195 \pm 0,0010$	$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
Konverzní faktor	CV [31, 32, 84]	2,0	-
Časová konstanta reforméru	τ_1 [32, 84]	2,0	s
Časová konstanta reforméru	τ_2 [32, 84]	2,0	s
Časová konstanta PI regulátoru	τ	3,0	s
Konstanta PI regulátoru	K [32]	0,25	-
Referenční molární tok metanu	q_{meth}^{ref}	$0,0075 \cdot 10^{-3}$	$\text{kmol}\cdot\text{s}^{-1}$
Požadovaná hodnota tlaku	p_{ref}	1,0	atm

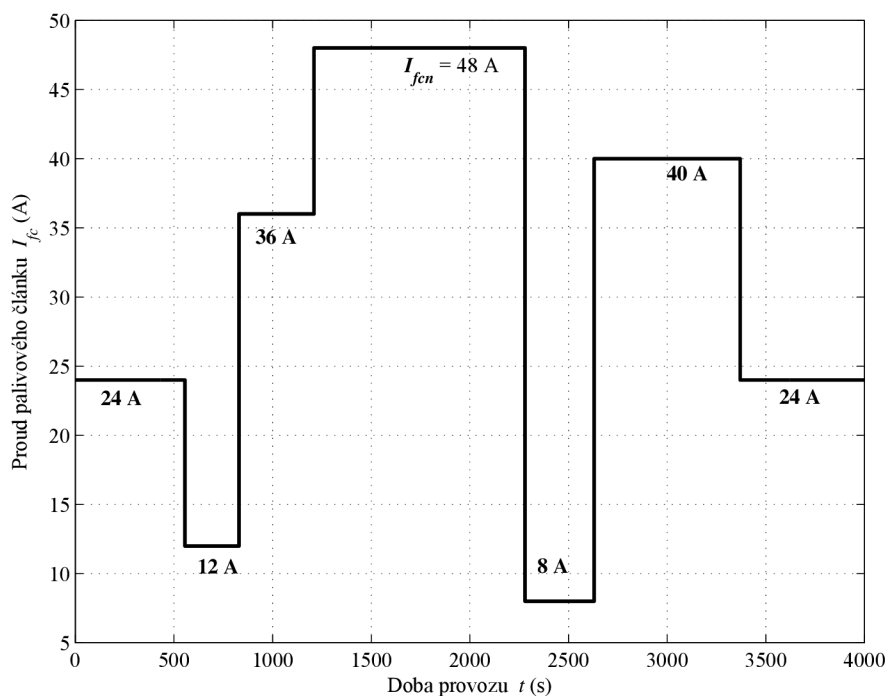
Rovnice (6.62) a (6.63) demonstrují, že samotná implementace reforméru umožňuje řízení molárního toku vodíku v závislosti na aktuálním výkonu PEMFC a pomocí zpětné vazby proudu [84]. Uvažuje-li se rovnice (6.45) a faktor využití vodíku z rovnice (6.56), je možné z proudu stanovit množství vodíku, jež je nezbytné pro pokrytí konkrétního zatížení PEMFC. Potřebné množství kyslíku vychází z rovnice (6.50). Implementaci

modelu reforméru znázorňuje Obr. 6.18, čímž je při simulacích částečně zohledněna skutečnost, že je vodík nejprve nutné vyrobit ze zemního plynu.



Obr. 6.18: Model reforméru implementovaný k modelu PEMFC

Charakter použité sekvence pulzů je obdobný jako v první části analýzy. Amplitudy a doby trvání jednotlivých pulzů jsou na rozdíl od první části odlišné. Hodnoty amplitud jsou více rozmanité. Dosahují se hodnoty, které představují zatížení článku odpovídající $\frac{1}{6}I_{fc}$, $\frac{1}{4}I_{fc}$, $\frac{1}{2}I_{fc}$, $\frac{3}{4}I_{fc}$, $\frac{5}{6}I_{fc}$ a I_{fcn} . Náhled na testovací zátěžný proud využitý ve druhé části je na Obr. 6.19.

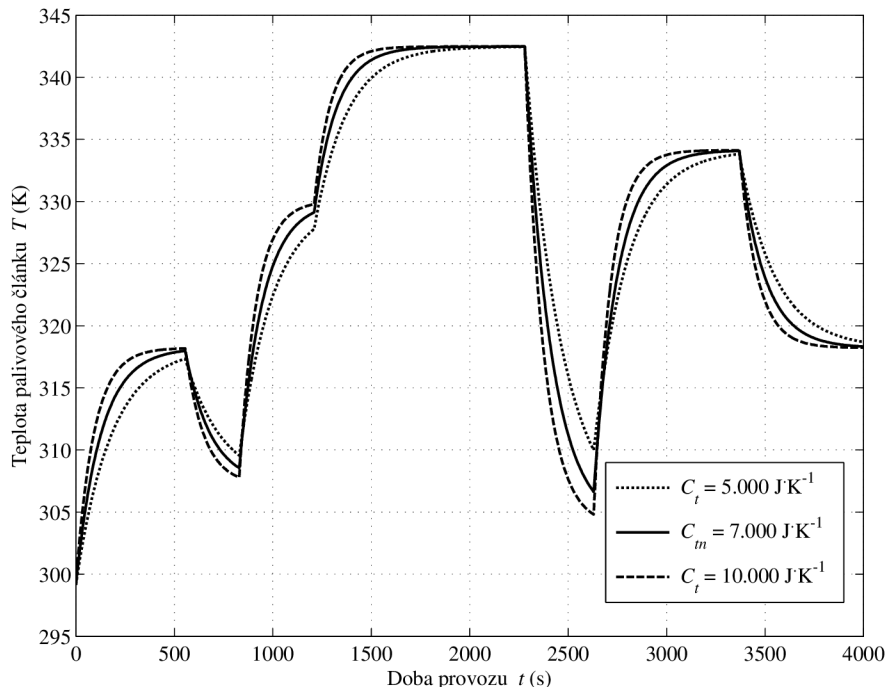


Obr. 6.19: Navržená sekvence pulzů a jejich amplitud představující zátěžný proud určený pro vyšetřování tepelných experimentů v rámci dynamického chování PEMFC

Podle Obr. 6.19 je celková délka sekvence pulzů opět 4.000 s, mění se však doby trvání jednotlivých pulzů. PEMFC pracuje delší dobu, konkrétně od 1.200 s do 2.300 s, s nominálním výkonem P_{fcn} při ustálené nominální teplotě $T_n = 343,15$ K. Doby trvání ostatních pulzů jsou kratší, což je vhodnější z pohledu hodnocení teplotního chování.

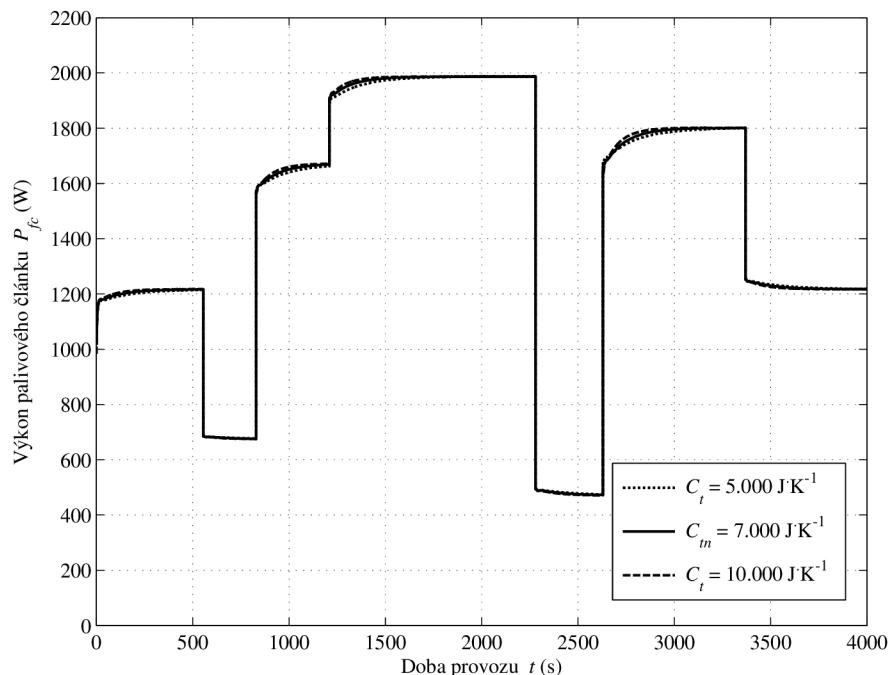
Jsou-li realizovány konstrukční či materiálové modifikace PEMFC, mají tyto změny přímý dopad na hodnoty výsledné tepelné kapacity C_t a tepelného odporu R_t , jež jsou

dle rovnic (6.59) a (6.60) zcela zásadní pro vývoj provozní teploty PEMFC a produkovaného tepla \dot{Q} . První experiment této části zkoumá vliv změny tepelné kapacity palivového článku na vývoj jeho teploty a výstupního výkonu. Následující Obr. 6.20 ukazuje porovnání provozních teplot PEMFC pro různé hodnoty tepelné kapacity.



Obr. 6.20: Vliv změny tepelné kapacity C_t na průběh provozní teploty PEMFC - tepelné kapacity: 5.000 J·K⁻¹, 7.000 J·K⁻¹ nominální, 10.000 J·K⁻¹

Podle Obr. 6.20 platí, že při úvaze nominálních hodnot $C_{tn} = 7.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ a $R_{tn} = 0,0195 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ dosáhne PEMFC své nominální provozní teploty $T_n = 343,15 \text{ K}$ v čase 1.820 s. Snížení hodnoty tepelné kapacity $C_t = 5.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ vede k tomu, že PEMFC dosáhne nominální teploty dříve, konkrétně v čase 1.750 s. Naopak při zvýšení hodnoty $C_t = 10.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ se dosáhne nominální teploty až v čase 2.050 s. Lze konstatovat, že změna hodnoty tepelné kapacity nemá žádný vliv na hodnotu maximální dosažené teploty. Význam její změny je zejména v rychlosti nárůstu teploty na její nominální hodnotu. Nelze předpokládat ani významnou změnu výkonu PEMFC. Obr. 6.21 doplňuje předchozí Obr. 6.20 a ukazuje porovnání výkonů pro různé hodnoty tepelné kapacity. Při zvýšení tepelné kapacity na 10.000 J·K⁻¹ dosáhne PEMFC nominálního výkonu rychleji, než při nominální kapacitě C_{tn} , což koresponduje s teoretickým předpokladem a výsledky na Obr. 6.20. Výsledkem zjištění je, že maximální změna výkonu ve zkoumaném časovém intervalu je přibližně 10 W. PEMFC, který pracuje v rámci hybridního systému není obecně vhodný pro vykrývání náhlých výkonových špiček. Proto je lepší pohlížet na PEMFC více komplexně a hledat uplatnění i produkované tepelné energie. Vhodnější je implementovat PEMFC do hybridního systému, který zužitkovává i tepelnou energii, například ve



Obr. 6.21: Vliv změny tepelné kapacity C_t na průběh výkonu PEMFC - tepelné kapacity: $5.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$, $7.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ nominální, $10.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$

spolupráci s kogenerační jednotkou. Pokud by PEMFC plnil v hybridním systému roli doplňkového zdroje elektrické energie, nejsou nároky na dynamické změny tepelné energie většinou tak značné. Pomine i nutnost významně zvyšovat celkovou hodnotu tepelné kapacity. Když se na PEMFC pohlíží primárně jako na zdroj tepelné energie, stává se informace o vývoji teploty velmi podstatnou, a to i pro samotnou konstrukci článku. Z pohledu tepelného zdroje je důležité dosáhnout vyšší provozní teploty při níž by byly zachovány nebo zlepšeny elektrické parametry. Obecně při konstrukci PEMFC je podstatnější zaměřit se na ovlivnění hodnoty tepelného odporu R_t . Významnou úlohu má i samotné zpracování a volba možných materiálů. Při znalosti součinitele přestupu tepla h je možné aplikovat vyjádření, které je popsáno v [42]

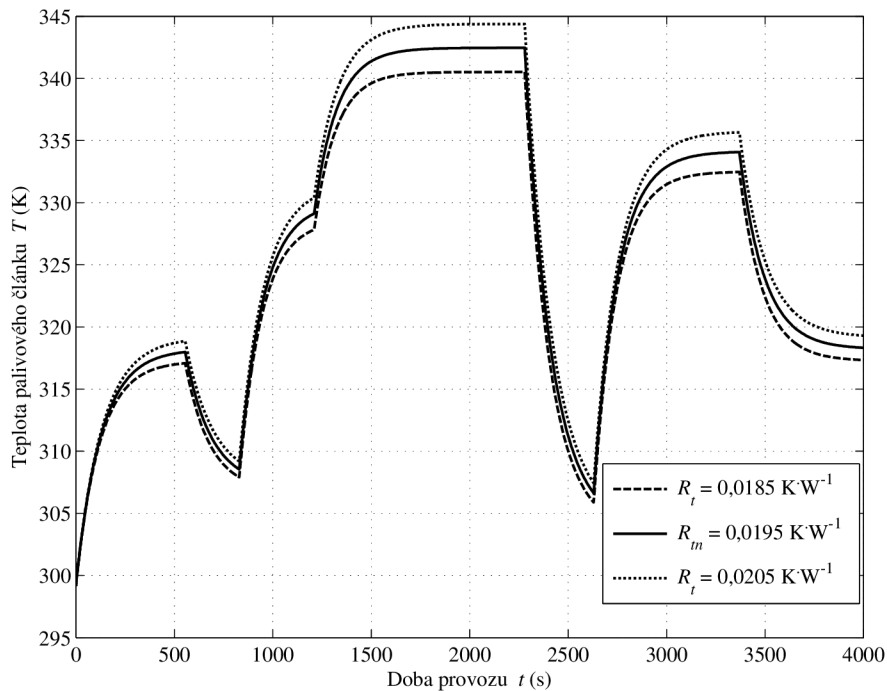
$$R_t = \frac{1}{h \cdot N_0 \cdot A}, \quad (6.64)$$

kde h je součinitel přestupu tepla jednoho samostatného palivového článku ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Stanovení tepelného odporu konkrétního vzorku se ověří měřením podle postupu, který je podrobně představen v [85] a který vychází z následujícího vztahu

$$R_T = \frac{A_s (T_U - T_L)}{\dot{Q}}, \quad (6.65)$$

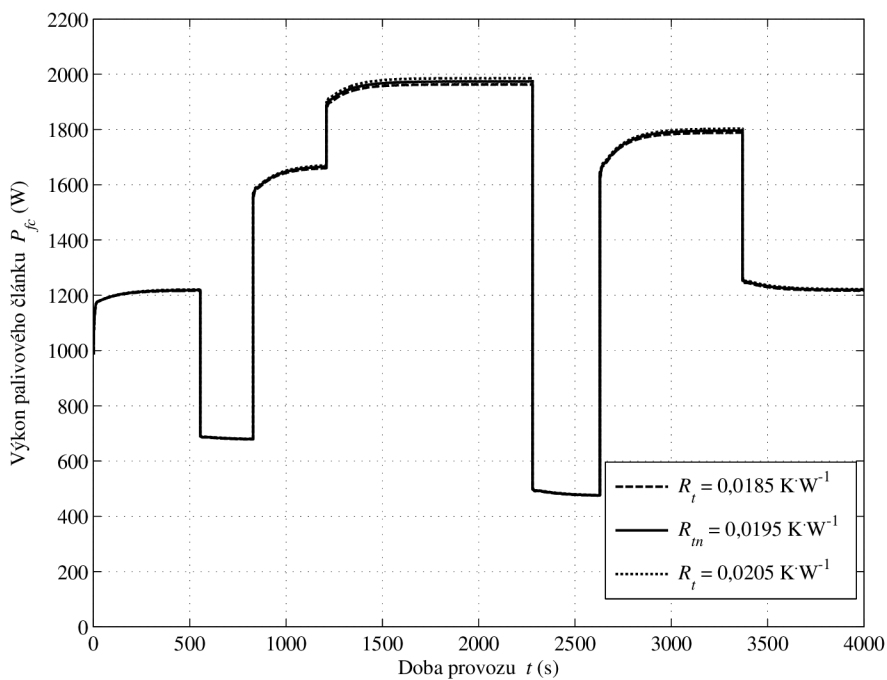
kde R_T je tepelný odpor ($\text{cm}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), A_s je plocha vzorku (cm^2), T_U je teplota horní desky (K) a T_L je teplota dolní desky (K).

Následující Obr. 6.22 ukazuje porovnání teplot PEMFC pro různé hodnoty tepelného odporu.



Obr. 6.22: Vliv změny tepelného odporu R_t na průběh provozní teploty PEMFC - tepelné odpory: $0,0185 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$, $0,0195 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ nominální, $0,0205 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$

Pro doplnění Obr. 6.23 uvádí tomu odpovídající porovnání výkonů PEMFC.



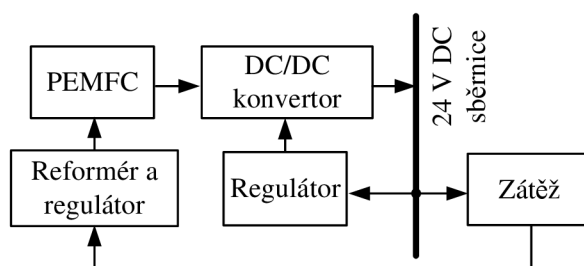
Obr. 6.23: Vliv změny tepelného odporu R_t na průběh výkonu PEMFC - tepelné odpory: $0,0185 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$, $0,0195 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ nominální, $0,0205 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$

Obr. 6.22 prezentuje skutečnost, že i malá změna tepelného odporu významně ovlivní provozní teplotu PEMFC. Závěrem je, že přibližně 5% změna tepelného odporu způsobí u simulovaného PEMFC změnu teploty přibližně 1,8 K. Obr. 6.23 ukazuje, že změnou tepelného odporu lze dosáhnout výkonu, jenž je vyšší než nominální výkon. Simulované výsledky informují, že 5% změna tepelného odporu představuje změnu výkonu simulovaného PEMFC jednotky wattů. Obr. 6.22 a Obr. 6.23 demonstrují důležité závislosti, které ovlivňují samotný návrh konstrukce a provedení PEMFC, neboť výsledky ukazují, že nevhodný přístup může změnit nominální parametry článku.

6.6.3 Model PEMFC, reformér, regulace a DC/DC konvertor - III. část

Ve třetí části analýzy již model PEMFC využívá modely reforméru a regulace tlaků. Tato konfigurace je ovšem doplněna o model snižujícího DC/DC konvertoru, který byl, stejně jako ostatní modely, vytvořen v MATLAB®/Simulink. Popis modelu snižujícího DC/DC konvertoru uvádí text níže. Vzhledem k tomu, že DC/DC konvertor představuje další elektrické zařízení je vhodné vyšetřit dynamické poměry i na tomto zařízení. Proto je analýza třetí části složena ze dvou samostatných experimentálních bloků. Oba bloky se zabývají dynamickým chováním PEMFC připojeného k DC/DC konvertoru. Každý blok je koncipován odlišně. Koncepce jednoho experimentálního bloku je zaměřena na vyšetření neelektrických veličin PEMFC a prezentuje další průběhy teploty a parciální tlak vodíku. Druhý blok se zabývá vytřením proudových a napěťových poměrů přímo na DC/DC konvertoru k němuž je PEMFC připojen.

Celý PEMFC subsystém je s uvažován s řídicí smyčkou. Následující Obr. 6.24 ukazuje zjednodušené blokové schéma modelovaného systému s PEMFC, reformérem a DC/DC konvertorem, který pracuje na 24 V DC sběrnici.

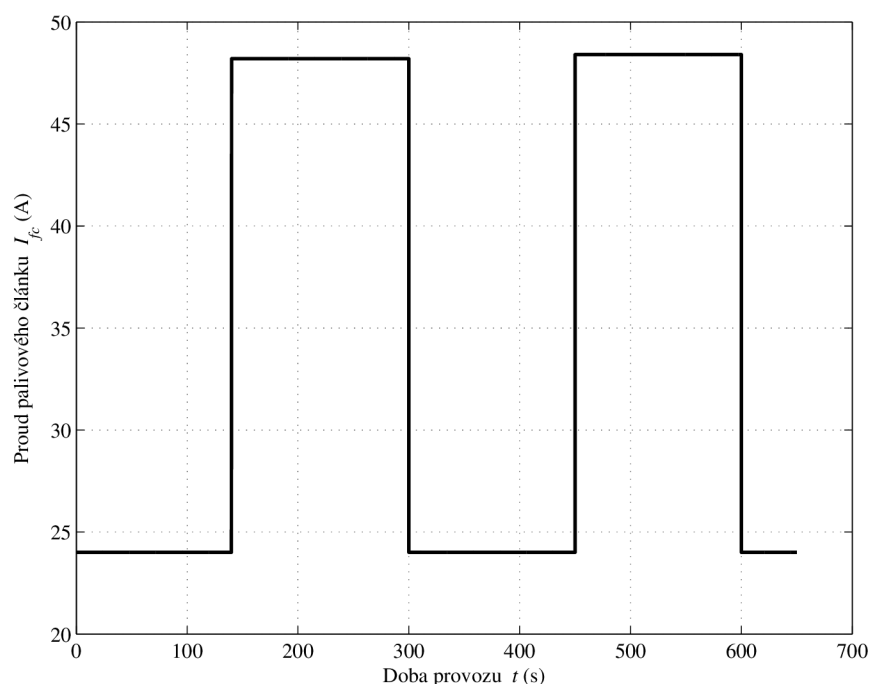


Obr. 6.24: Blokové schéma znázorňující PEMFC, reformér a DC/DC konvertor pracující na 24 V DC sběrnici

Proměnná zátěž se připojí na výstup konvertoru, který reguluje výstupní napětí PEMFC. Platí, že proud článku I_{fc} koreluje se zátěžným proudem. Na základě výkonu zátěže je vytvořena zpětná vazba směřující do PEMFC a reforméru.

Předchozí výsledky ukazují, že provozní teplota PEMFC je velmi důležitým parametrem, jenž velmi ovlivňuje výsledný dodávaný výkon P_{fc} . Účelem dalších simulací

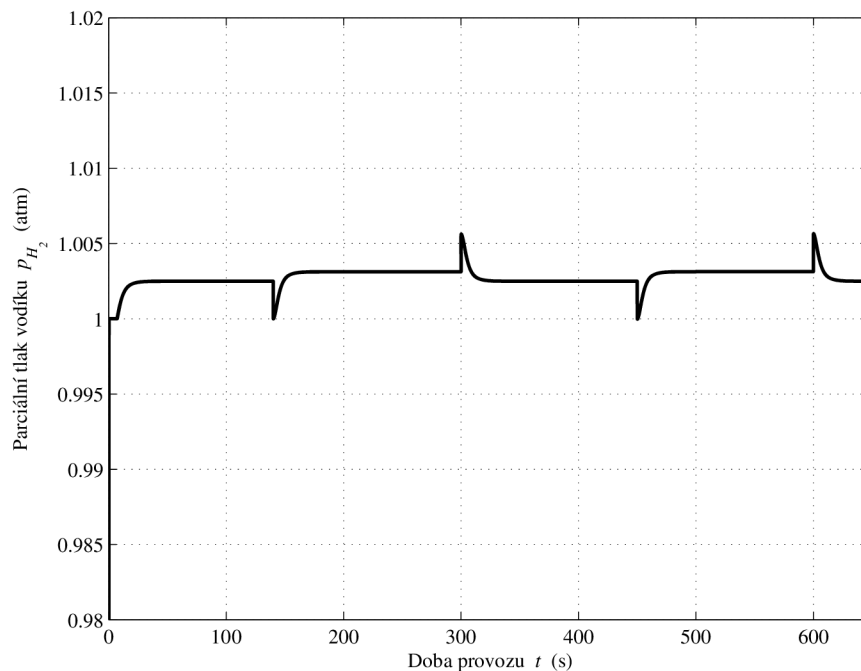
je zkoumání vlivu teploty i na další neelektrické parametry PEMFC. První experimentální blok využívá proto takovou sekvenci zátěžného proudu, kdy PEMFC nedosáhne na nominální provozní teplotu, čímž je vlastně demonstrována neschopnost PEMFC dodávat nominální výkon P_{fcn} . Z pohledu dosažení nominální teploty PEMFC je celková doba simulace krátká a je simulován provozní stav PEMFC, někdy také nazývaný jako studený start. Je nutné zmínit, že tento specifický provozní stav je hodně komplexní a nesouvisí pouze s teplotou. Neschopnost PEMFC dodávat nominálního výkon P_{fcn} musí být v případě jeho spolupráce v rámci hybridního systému respektována vhodnou definicí požadavků na tento zdroj a správným nastavením řídicího algoritmu systému jako celku. Průběh využitého testovacího zátěžného proudu je na Obr. 6.25. Ukazuje, že



Obr. 6.25: Navržená sekvence pulzů a jejich amplitud představující zátěžný proud určených pro vyšetřování dynamického chování neelektrických veličin na PEMFC

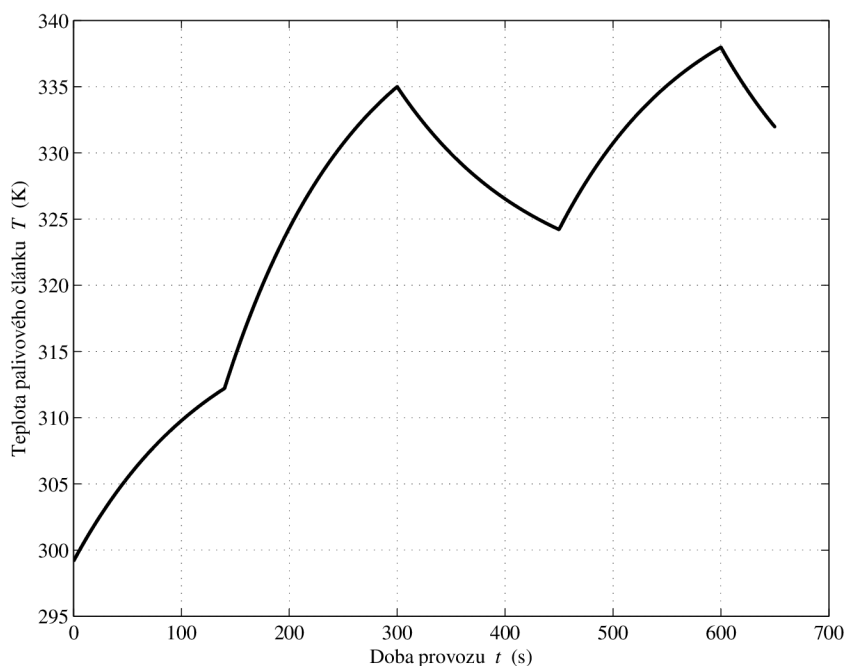
pro vyšetřování neelektrických veličin na PEMFC je využito sekvence zátěžných pulzů s celkovou dobou trvání 650 s. Charakter sekvence pulzů se volí takovým způsobem, aby obsahoval významnou skokovou změnu zátěžného proudu. Amplitudy pulzů odpovídající zatížení $\frac{1}{2}I_{fc}$ začínají v časech 0 s, 300 s a 600 s a pulzy charakterizující plné zatížení jsou zahájeny v časech 140 s a 450 s. Sekvence tedy obsahuje dva velikostně stejné nárůsty a poklesy zatížení, jež mají téměř shodnou dobu trvání.

Velmi důležitá je i znalost vývoje parciálního tlaku a jeho případná regulace. Následující Obr. 6.26 představuje vliv změny zátěže na parciální tlak vodíku.



Obr. 6.26: Průběh parciálního tlaku vodíku pro navržený zátěžný proud

Následující Obr. 6.27 ukazuje vývoj provozní teploty PEMFC a demonstruje pouze skutečnost, že pro navrženou zátěž není dosaženo nominální provozní teploty 343,15 K.



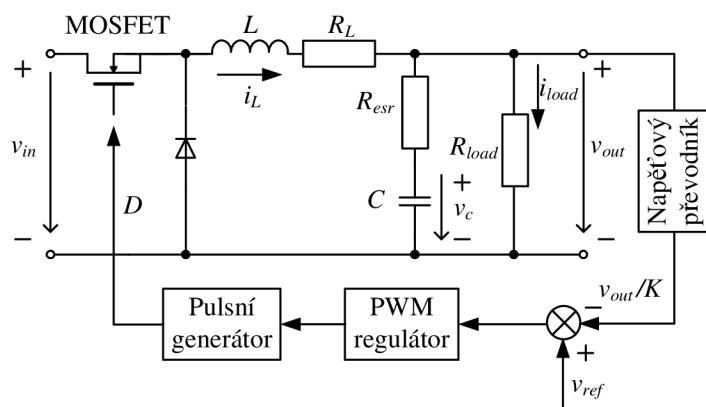
Obr. 6.27: Vývoj provozní teploty PEMFC pro navržený zátěžný proud určený k vyšetřování dynamického chování neelektrických veličin na PEMFC

Obr. 6.26 představuje vliv změny zátěže na parciální tlak vodíku PEMFC při využití regulace tlaku pomocí požadovaného tlaku p_{ref} a referenčního molárního toku q_x^{ref} . Tlak se udržuje kolem hodnoty 1,0 atm. Na stejnou hodnotu je regulován i tlak kyslíku.

Podle Tab. 6.7 využívají jednotlivé reaktanty rozdílné molární (k_{H_2} a k_{O_2}) a časové konstanty (τ_{H_2} a τ_{O_2}), tudíž při aplikaci rovnic (6.42) a (6.47) je zřejmé, že i samotné změny tlaků probíhají odlišně. Z Obr. 6.27 je zase patrné, že teplota PEMFC na začátku simulace je rovna 298,15 K. Stejná hodnota je uvažována i pro teplotu okolí. V provedených simulacích se vždy předpokládá, že PEMFC je před uvedením do provozu v teplotně ustáleném stavu s teplotou okolí. Z průběhu teploty na Obr. 6.27 lze sledovat, že například při zátěžném proudu 48,0 A v časovém intervalu od 450 s do 600 s dochází k nárůstu teploty přibližně o 14 K. Naproti tomu, přecházející časový interval od 300 s do od 450 s ukazuje pokles teploty PEMFC. Odebíraný proud zátěží odpovídá $\frac{1}{2}I_{fc}$, což společně i s úvahou přestupu tepla do okolí vede ke snížení provozní teploty přibližně o 10 K.

6.6.3.1 Model snižujícího DC/DC konvertoru

Obecně lze říci, že elektrická zařízení vyžadují pro svoji správnou činnost relativně konstantní napětí. Výstupní napětí PEMFC není konstantní, a proto je nezbytné takové zařízení, jež by udržovalo jeho výstupní napětí na požadované hodnotě. U hybridních systémů s PEMFC se často jedná o DC/DC konvertory a napětí stejnosměrné sběrnice. Konkrétní volba zařízení či napětí závisí na použité koncepci hybridního systému. Výsledky dle Obr. 6.12 a Obr. 6.13 ukazují, že již při ustálených stavech PEMFC pro různé provozní podmínky jsou napětí odlišná. Tuto skutečnost demonstruje analýza dynamického chování článku, konkrétně na průběhu výstupního napětí na Obr. 6.17 [35]. Topologie DC/DC konvertoru je vyznačena na následujícím Obr. 6.28 [59]



Obr. 6.28: Základní topologie snižujícího DC/DC konvertoru (modifikováno z [59])

Z Obr. 6.28 [59] vyplývá, že pulzy pro hradlo tranzistoru jsou generovány prostřednictvím zpětné vazby přes PID regulátor. Jedna z možných koncepcí snižujícího DC/DC konvertoru, jež využívá IGBT transistor, je představena v [38]. Naproti tomu [86] uvádí koncepci postavenou na MOSFET transistorech. Následující vztahy popisují závislosti vycházející z obvodu na Obr. 6.28 [59].

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - i_{load}, \quad (6.66)$$

kde C je kapacita (F), dv_c je změna napětí kondenzátoru konvertoru (V), i_L je proud induktorem (A) a i_{load} je proud zátěže (A).

$$L \frac{di_L}{dt} = D \cdot v_{in} - i_L \cdot R_L - v_c - (i_L - i_{load}) \cdot R_{esr}, \quad (6.67)$$

kde L je indukčnost (H), di_L je změna proudu induktorem (A), D je střída (-), v_{in} je vstupní napětí konvertoru (V), R_L je odpor induktoru (Ω), v_c je napětí na kondenzátoru (V) a R_{esr} je ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru (Ω).

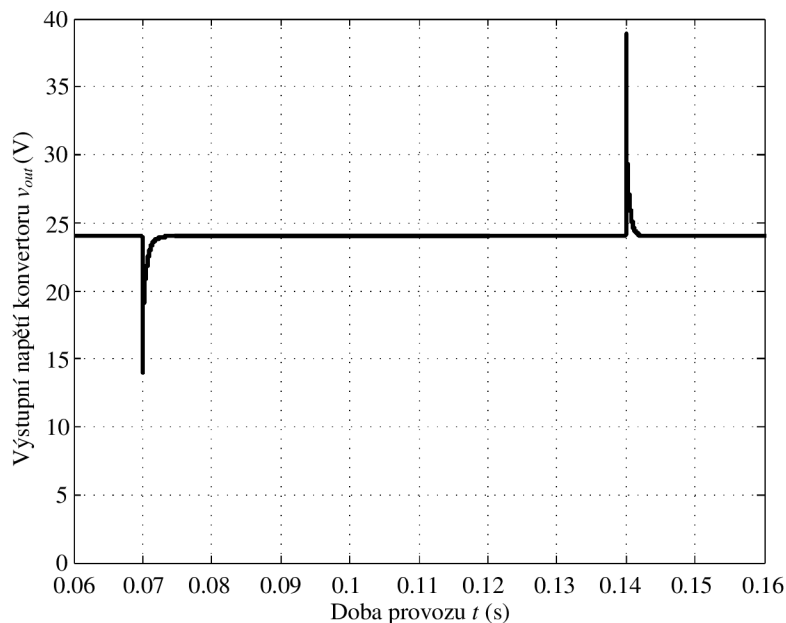
$$v_{out} = v_c + (i_L - i_{load}) \cdot R_{esr} \quad (6.68)$$

kde v_{out} je výstupní napětí konvertoru (V). Obr. 6.28 [59] také ukazuje, že výstupní napětí konvertoru je regulováno pomocí spínacího signálu střídy, jež lze vyjádřit jako poměr v_{out}/v_{in} [42]. Je-li podle [42] $0 \leq D \leq 1$, potom platí, že výstupní napětí konvertoru je vždy nižší než jeho vstupní napětí.

Snižující DC/DC konvertor je řízen pomocí PID regulátoru, který udržuje napětí 24 V DC. Přenosová funkce, která popisuje PID regulátor je představena například v [70]. Snížující konvertor, který je vytvořený v MATLAB[®]/Simulink a využívá generátoru trojúhelníkových vln pro pulsní šířkovou modulaci (PWM) připojeného k tranzistoru MOSFET, je uveden v [86]. Další podobná MOSFET koncepce je popsána v [31], která je navržena pro 2 kW PEMFC subsystém. Jelikož je konvertor připojen k PEMFC o výkonu 2 kW, pohybuje se frekvence nosné vlny v rozsahu od 20 kHz po 30 kHz. Je-li realizována dlouhodobá matematická simulace PEMFC, je podle [42] vhodné aplikovat takzvaný průměrný model (z angl. averaged model) snížujícího DC/DC konvertoru. Model je využit i v této práci a koresponduje s Obr. 6.28 [59].

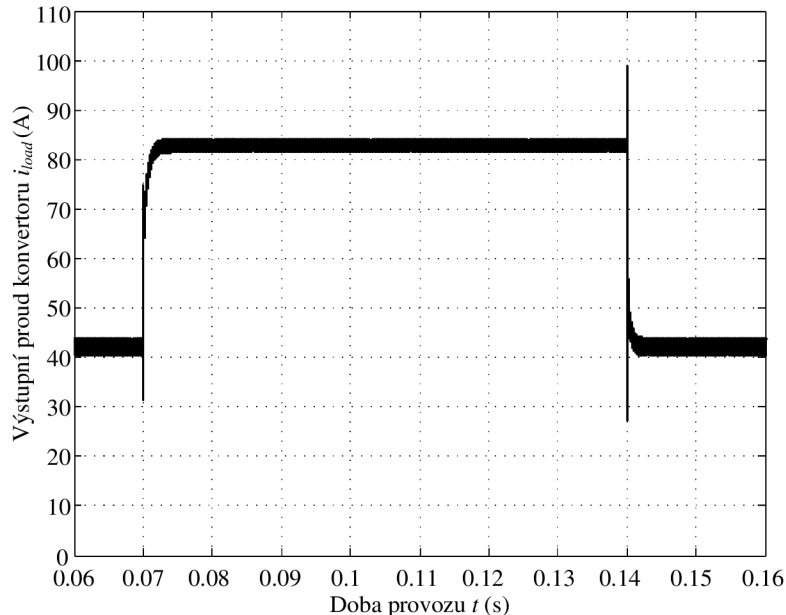
Druhý blok experimentů se zaměřuje na analýzu výstupních elektrických parametrů snížujícího DC/DC konvertoru. K vyšetřování elektrických parametrů na DC/DC konvertoru je využito sekvence, která obsahuje jeden velikostně stejný nárůst a pokles zatížení a která má celkovou dobu trvání 0,16 s. Na počátku sekvence využívá blok zatížení s amplitudou odpovídající $\frac{1}{2}I_{fc}$. V čase 0,07 s dochází ke zvýšení zátěžného proudu na jeho nominální hodnotu I_{fc} , aby v čase 0,14 s mohlo dojít opět k odlehčení na $\frac{1}{2}I_{fc}$. Změny elektrických parametrů na DC/DC konvertoru jsou více dynamické, proto i celková doba simulace a sekvence zátěžných pulzů se navrhuje odlišně, a to s ohledem na očekávané výsledky. Jelikož bylo nezbytné nastartovat simulaci, obsahuje počátek simulace nereálné výsledky. Dosažené výsledky jsou proto prezentovány až od 0,06 s, kdy se vliv nastartování již neprojevoval. Lze konstatovat, že nastartování simulace neovlivňuje výsledky získané po čase 0,06 s.

Následující Obr. 6.29 ukazuje výstupní napětí konvertoru v_{out} . Demonstruje maximální napěťový pokles 14 V, a to během změny zatížení z polovičního na nominální



Obr. 6.29: Průběh výstupního napětí snižujícího DC/DC konvertoru

hodnotu. Naproti tomu, při odlehčení zátěže z nominální hodnoty I_{fcn} na zatížení poloviční $\frac{1}{2}I_{fc}$ v čase 0,14 s dochází k nárůstu výstupního napětí přibližně na 39 V. Obr. 6.30 přináší průběh výstupního proudu konvertoru i_{load} .



Obr. 6.30: Průběh výstupního proudu snižujícího DC/DC konvertoru

Obr. 6.30 ukazuje rychlý pokles výstupního proudu DC/DC konvertoru v okamžiku první změny odebíraného výkonu. Po tomto počátečním poklesu se hodnota výstupního proudu ustálí přibližně na hodnotě 84 A. V čase 0,14 s, kdy dochází ke snížení odebíraného výkonu zátěží. Zaznamenán je jak rychlý nárůst, tak i pokles odebíraného proudu. Následně potom se proud ustálí přibližně na hodnotě 42 A.

7 Fotovoltaický článek a jeho simulace

Kapitola popisuje princip fotovoltaického článku a přináší základní údaje o této technologii. Dále se zabývá problematikou matematického modelování fotovoltaického modulu a konkretizuje potřebné vstupní parametry a jejich vzájemné vazby. V návaznosti na to je představen vytvořený matematický model fotovoltaického modulu a je provedena jeho verifikace. Následuje diskuze nad výsledky provedených experimentů, při kterých je využita i vhodná implementace reálných hydrometeorologických dat. Popis modelu a jeho verifikace autor prezentuje v [28]. Kapitola také přibližuje dlouhodobé kontinuální měření statického fotovoltaického referenčního modulu. Rovněž prezentuje výsledky provedené analýzy, která směřovala k ověření vhodnosti užití veřejných databází slunečního záření a teplot, jakožto zdroje vstupních veličin pro matematický model. Výsledky analýzy posloužily pro zhodnocení samotné výkonové disponibility fotovoltaického zdroje pro jednotlivé měsíce v dané lokalitě. Výsledky analýzy byly autorem publikovány konkrétně v [2] a v [87].

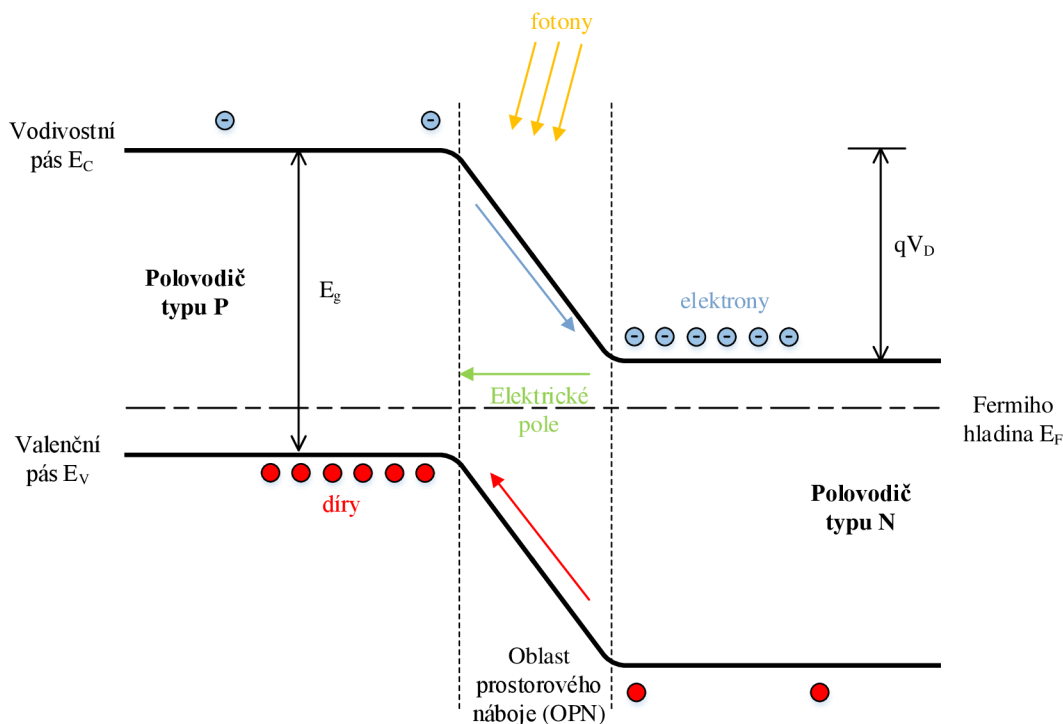
7.1 Princip fotovoltaického článku

Fotovoltaický měnič (dále článek) představuje zařízení, které využívá vnitřního fotoelektrického jevu a které je schopné přímo konvertovat sluneční energii na energii elektrickou. Svým principem se jedná o polovodičovou diodu s P-N přechodem, ve kterém dochází ke generování párů elektron díra. Vzhledem k tomu, že v současné elektroenergetice jsou nejpoužívanější polovodičové články na bázi krystalického křemíku, je základní princip vysvětlen a demonstrován na tomto typu článku. Podrobný popis principu fotovoltaického článku je uveden v [88]. V principu fotovoltaický článek tvoří spojení křemíkových vrstev typu N a typu P, které představují P-N přechod [88]. Obecně se může jednat o homogenní nebo heterogenní přechod, podle toho jestli se využije chemicky stejných nebo odlišných materiálů [89]. Další používané materiály přibližuje podkapitola 7.2.

7.1.1 Pásově energetické schéma a dotování

Atom křemíku Si, jakožto polokov ze IV. A skupiny, obsahuje obecně 14 elektronů, z nichž poslední čtyři představují valenční elektrony, které se sousedními atomy křemíku tvoří a sdílí kovalentní vazby. Vzhledem k principu fotovoltaického článku je možné pomocí příměsí měnit vlastnosti polovodiče, kdy je krystalová mřížka čtyřmocného křemíku dotována o nepatrné množství atomů z III. A nebo V. A skupiny, respektive o trojmocné nebo pětímocné atomy. V případě dotování o trojmocné atomy (tzv. akceptory) vzniká nenasycená vazba a je vytvořena díra s kladným nábojem. Použitím pětímocných prvků (tzv. donory) jeden valenční elektron přebývá a je velmi slabě vázán elektrostatickou interakcí. Již při nízkých teplotách se z vazby s atomem uvolní

a vytváří volný elektron se záporným nábojem. Obr. 7.1 ilustruje pásové energetické schéma jednoduchého homogenního přechodu P-N.



Obr. 7.1: Schématické znázornění energetických pásového P-N přechodu tvořeného chemicky stejnými materiály

Vzhledem k tomu, že elektrony v krystalu křemíku podléhají působení sil, energie elektronu nabývá konkrétních hodnot. Hladiny energie jsou rozděleny do takzvaných pásového dovolených energií, které jsou odděleny pásového zakázaných energií. Bude-li nejvyšší energetická hladina valenčního pásového značena jako E_V a nejnižší hladina vodivostního pásového jako E_C , pak šířka zakázaného pásového E_g se uvažuje jako jejich rozdíl $E_C - E_V$. energii zakázaného pásového lze chápat jako minimální množství energie, které je potřebné pro uvolnění elektronu z kovalentní vazby.

Plně obsazený valenční pás se skládá z energetických stavů valenčních elektronů, které nemohou zprostředkovat vedení elektrického proudu. V místě přechodu přejde určitá část volných elektronů z oblasti N do oblasti P, respektive část děr přejde z oblasti P do oblasti N. Vytvoří se tak vnitřní elektrické pole, které má směr od N k P a brání tak přesunu majoritních nosičů proudu přes přechod [89]. V případě, že je fotovoltaický článek vystaven působení elektromagnetického záření (světla) a je dodána energie ve formě fotonů, některé elektrony mohou přejít z valenčního pásového do pásového vodivostního. Nosiče proudu generované zářením jsou vnitřním polem urychlovány a elektrony směřují do oblasti typu N a díry do oblasti typu P [89]. U článku připojeného k vnějšímu obvodu, se začnou záporné a kladné náboje vyrovnávat a obvodem teče elektrický proud.

Je-li křemík s $E_g = 1,12$ eV [1] a teplotou přibližně 300 K vystaven působení fotonů o energii vyšší než je tato hodnota, fotony způsobí uvolnění elektronu z kovalentní vazby. Současně s tím dochází ke vzniku díry, místa, kde byl elektron původně vázán. Přebytková energie je přeměněna na energii tepelnou. Tím, že elektrony přešly na hladinu vodivostního pásu s vyšší energií, nebude valenční pás elektrony již plně obsazen a elektrony mohou zprostředkovat vedení elektrického proudu. Elektrony mají záporný elektrický náboj a pohybují se proti směru intenzity elektrického pole. Vzhledem k tomu, že díry společně s elektrony tvoří vnitřní nosiče náboje, podílejí se i díry, jakožto částice s kladným nábojem, na vedení elektrického proudu, a to v opačném směru než elektrony. Bude-li však křemík vystaven působení fotonů o energii nižší než 1,12 eV, nezpůsobí fotony uvolnění elektronu z kovalentní vazby. Obecně, koncentrace párů elektron-díra závisí na velikosti zakázaného pásu a na teplotě. Podrobný popis fotovoltaického článku na úrovni výpočtů koncentrací akceptorů a donorů uvádí například [10].

Na druhou stranu, v polovodičích dochází také k zániku volných nosičů náboje, když rekombinují a nadbytečná energie je přeměněna v teplo či v záření. Tyto rekombinace mohou u článku představovat až 8,5% ztrátu [90]. Nejvýznamnější druhy těchto rekombinací podrobněji popisuje [88]. Celková energetická bilance fotovoltaického článku na bázi krystalického křemíku je zachycena a vyčíslena v [90]. Tato bilance deklaruje skutečnost, že značnou část elektromagnetického záření, konkrétní oblasti jeho spektra, účinně článek nevyužije. Jiné technologie článků, které jsou schopny lépe využít záření podél celého spektra, přibližuje podkapitola 7.2.

7.1.2 Energie elektromagnetického záření

Z obecného popisu je zřejmé, že pro stanovení množství elektronů, které může být generováno, je důležité znát tok fotonů ϕ nebo energii dopadající na povrch fotovoltaického článku G . Tok fotonů ϕ je definován jako počet fotonů se specifickou energií (vlnovou délkou) dopadající na jednotkovou plochu za jednotku času. Dopadající energie G je někdy označována jako intenzita ozáření [91]. Existují však i další způsoby stanovení množství slunečního záření [91].

Výše zmíněná konverze energií u fotovoltaických článků využívá fyzikálního jevu, při kterém dochází k fotoelektrické emisi elektronů vlivem absorpce kvanta elektromagnetického záření. Následující vztah ukazuje, že energie takto emitovaného elektronu je úměrná vlnové délce, případně frekvenci dopadajícího záření [92, 93].

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (7.1)$$

kde E je energie (J), h je Planckova konstanta ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$), c je rychlost světla ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a λ je vlnová délka (m). Elektromagnetické záření se vyznačuje takzvanou dualitou částice a vlny, kdy se na záření pohlíží jako na částice a současně jako na vlny. Vzhledem

k tomuto dualistickému charakteru, se ve spojitosti s energií fotonu, jakožto částice, používá jednotka eV. Platí, že 1 eV odpovídá $1,602 \cdot 10^{-19}$ J. Rovnice (7.1) představuje, že velikost energie elektromagnetického záření závisí na vlnové délce a je nutné uvažovat celé spektrum. Elektromagnetické záření se tak skládá z vysokoenergetických fotonů s krátkou vlnovou délkou a z fotonů s nízkou energií a dlouho vlnovou délkou. Tato schopnost je důležitá v souvislosti s potřebou překonat určitou šířku zakázaného pásu daného fotovoltaického článku. Fotoelektrický jev je podrobněji popsán v [93].

7.2 Druhy fotovoltaických článků

Technologie fotovoltaických článků představuje velmi rozsáhlou problematiku, která se prolíná několika humanitními a technickými obory. V současnosti se lze setkat s existencí řady druhů článků, které se navzájem liší použitým materiálem nebo technologií výroby. Následující část práce se proto věnuje výčtu a stručnému popisu základních druhů fotovoltaických článků. Je zřejmé, že jednotlivé druhy článků se navzájem liší i svým využitím a svojí finální implementací do praxe. Zohledněním řady aspektů, nejen technických, ale i ekonomických, lze konstatovat, že aktuální koncepce fotovoltaických systémů v elektroenergetice je založena výhradně na monokrystalické a polykrystalické technologii článků.

7.2.1 Monokrystalické články

Monokrystalické články se nejčastěji vyrábí pomocí Czochralského metody, která využívá jako vstupní surovinu ingotu polykrystalického křemíku [90]. Následující Tab. 7.1 [94] ukazuje dosavadní vývoj účinností jednotlivých druhů fotovoltaických článků. Přináší přehled o maximálních dosažených účinnostech jednotlivých druhů laboratorně a experimentálně vyráběných článků, který byl sestaven Národní laboratoří pro obnovitelnou energii (NREL). Tabulka také informuje o tom, která instituce či výzkumná laboratoř této účinnosti dosáhla. Vzhledem k tomu, že v současnosti jsou fotovoltaické články doplňovány o koncentrátory, obsahuje tabulka i informace o použitých koncentračních poměrech. Účinnost jednotlivých druhů průmyslově vyráběných článků je oproti experimentálně a laboratorně vyvíjeným článkům nižší, jelikož ve skutečnosti existuje určitá časová latence, kdy jsou laboratorně dosažená data zavedena do reálné výroby. Podle Tab. 7.1 [94] je maximální dosažená účinnost monokrystalického článku bez koncentrátorového zařízení rovna 25,0 %. Oproti tomu průmyslově vyráběné články pracují s účinnostmi do 22,0 % [4]. Pro monokrystalický článek je teoretický limit účinnosti 29,0 % a v úvahu se berou nulové povrchové rekombinace a ideální absorpce dopadajícího záření [95].

Tab. 7.1: Maximální dosažené účinnosti jednotlivých fotovoltaických článků [94]

Typ + (koncentrační poměr)	Účinnost (%)	Instituce
Tandemový - 4 přechody (297x)	44,7	Soitec
Tandemový - 3 přechody (302x)	44,4	Sharp
Tandemový - 5 přechodů	38,8	Boeing - Spectrolab
Tandemový - 3 přechody	37,9	Sharp
Tandemový - 2 přechody (467x)	34,1	NREL
Tandemový - 2 přechody	31,1	NREL
GaAs koncentrátorový (117x)	29,1	FhG-ISE
GaAs tenkovrstvý	28,8	Alta Devices
Si monokrystalický (92x)	27,6	Amonix
GaAs monokrystalický	26,4	NREL
Křemíkové heterostrukтуры	25,6	Panasonic
Si monokrystalický	25,0	SunPower
CIGS tenkovrstvý (14,7x)	23,3	NREL
Si tenkovrstvý	21,2	Solex
CdTe tenkovrstvý	21,0	First Solar
CIGS tenkovrstvý	20,9	Solar Frontier
Si polykrystalický	20,4	FhG-ISE
Struktura perovskitu	17,9	KRICT
Si amorfnní tenkovrstvý	13,4	LG Electronics
DSSC	11,9	Sharp

7.2.2 Polykrystalické články

Polykrystalické články se mohou vyrábět pomocí odlévání čistého křemíku do bloků nebo pomocí metody tažení z kelímku [96], rovněž lze využít i tažení pásů pomocí metody EFG [97]. Zjednodušeně lze říci, že tento článek má vyšší ztráty rekombinací, jelikož jeho vnitřní struktura má náhodně orientovaná krystalická zrna [95]. Tab. 7.1 [94] ukazuje, že maximální dosažená účinnost je nižší než u monokrystalických článků. Jestliže platí, že celková účinnost článků je závislá i na dalších výrobních procesech, nelze jednoznačně konstatovat, že průmyslově vyráběné polykrystalické články mají vždy nižší účinnost než články monokrystalické [95].

7.2.3 Ostatní články

Monokrystalické a polykrystalické technologie představují pomyslnou první generaci článků, která se dnes vyznačuje dominantním postavením na trhu. I když výroba spo-

třebobává značné množství čistého křemíku [4]. Doplnující informace o těchto článcích uvádí [90]. Další generace fotovoltaických článků se proto snaží o minimalizaci množství použitého křemíku. Pro technologie na bázi amorfního křemíku je již typická tenčí vrstva [90]. Samotné ztenčení vrstvy článků přináší i redukci hmotnosti, což se může pozitivně projevit na mechanických vlastnostech fotovoltaického modulu jako celku. Na druhou stranu je nutné si uvědomit, že články obsahují nižší množství křemíku, což vede ke snížení maximálně dosažitelné účinnosti. Využití jiných materiálů je možná cesta, jak redukovat množství použitého čistého křemíku. Nové materiály vedly ke vzniku GaAs a CdTe článků či ke vzniku směsných polovodičů, které představují CIS struktury (obsahují Cu, In a Se) a CIGS struktury (obsahují Cu, In, Ga a Se) [95]. Snahou je maximalizace energetické výtěžnosti z dopadajícího slunečního záření, a to formou několikanásobných přechodů tenkých vrstev.

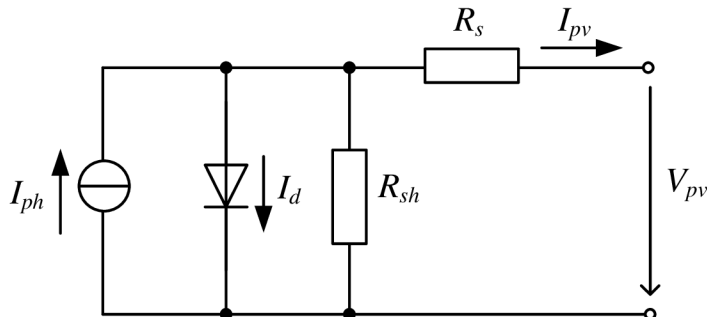
Pro další generaci je tak charakteristická možnost ovlivňovat elektrické a optické vlastnosti článku. Navazuje se na myšlenku využít plné spektrum slunečního záření, když jsou jednotlivé vrstvy článku schopny využít odlišné vlnové délky dopadajícího záření. Existují tandemové články nebo články kombinující monokrystalický článek s amorfním tenkovrstvým, přitom vzniká heterogenní spojení s vnitřní tenkou vrstvou (HIT) [90] a další. Řada světových výzkumných laboratoří [94], jako například NREL, Fraunhoferský institut pro solární energetické systémy (FhG-ISE) nebo Korejský výzkumný institut chemických technologií (KRICT), se zabývají koncentrovanou fotovoltaikou (CPV). Články vystavují mnohem vyšším intenzitám ozáření a světlo je prostřednictvím optického koncentrátoru směřováno přímo na aktivní plochu článku. Existují i technická řešení, kdy barvivem senzitivovaný solární článek (DSSC) využívá pro výrobu elektrické energie organických látek [95]. Taková řešení však v blízké budoucnosti nejspíše uplatnění v elektroenergetice nenaleznou.

7.3 Popis vstupních parametrů fotovoltaického modulu

Obecně platí, že pokud mají fotovoltaické články efektivně využity, musí disponovat odpovídajícími elektrickými parametry a mechanickými vlastnostmi. Pro účely elektroenergetiky parametry samostatného článku ovšem nedosahují hodnot, které je možné účinně využít. Jednotlivé články jsou proto navzájem propojeny a jsou doplněny o další konstrukční prvky. Takto propojené články tvoří fotovoltaický modul, který má vhodné parametry a vlastnosti pro praktické využití. Moduly s přesně danými parametry je možné dále vzájemně propojovat a vytvořit fotovoltaické pole, respektive celý fotovoltaický systém o požadovaných elektrických parametrech.

Technologie článku musí zajistit maximální generaci nosičů náboje a minimalizovat rekombinaci. Za předpokladu použití krystalického křemíku je pro vyjádření I-V charakteristiky P-N přechodu možné využít Shockleyho aproximace [95], která zaručuje dostatečnou přesnost [98]. Fotovoltaický článek je možné modelovat pomocí ekviva-

lentního elektrického obvodu, který ukazuje na Obr. 7.2 a který se skládá ze zdroje proudu, diody a dvou rezistorů [99, 100]. Pomocí zdroje proudu je vyjádřen fotovoltaický proud I_{ph} generovaný dopadajícími fotony, pomocí diody je vyjádřen P-N přechod v propustném směru a rezistory představují vnitřní odpory článku jako celku.



Obr. 7.2: Jednodiodové ekvivalentní elektrické schéma fotovoltaického článku respektující vliv sériového R_s a paralelního odporu R_{sh}

Podle [99–101] lze vztah mezi výstupním napětím V_{pv} a proudem fotovoltaického článku I_{pv} vyjádřit dle následující rovnice. Rovnice ilustruje skutečnost, že $I_{pv} = f(V_{pv}, I_{pv})$ a současně $V_{pv} = f(I_{pv}, V_{pv})$ a musí být řešena prostřednictvím Newton-Raphsonovy iterační metody, jelikož rovnice nevede na přímé řešení.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}}, \quad (7.2)$$

kde I_{pv} je výstupní proud fotovoltaického článku (A), I_{ph} je fotovoltaický proud (A), I_0 je saturační (v závěrném směru) proud (A), V_{pv} je výstupní napětí modulu (V), R_s je sériový odpor článku (Ω), n je faktor kvality diody, V_t je teplotní napětí (V) a R_{sh} je paralelní odpor článku (Ω). Výše použité značení veličin fotovoltaického článku bude dále v práci odpovídat ekvivalentním veličinám vztažených na celý fotovoltaický modul, jelikož tento je složen z jednotlivých článků zapojených do série.

Zjednodušeně lze říci, že vztah mezi proudem a elektrostatickým potenciálem napříč P-N přechodu závisí na tepelném napětí. Tepelné (termické [10]) napětí fotovoltaického modulu se může vyjádřit jako [102]

$$V_t = \frac{k \cdot T \cdot N_s}{e}, \quad (7.3)$$

kde k je Boltzmannova konstanta ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$), T absolutní teplota fotovoltaického modulu (K), N_s je počet článků spojených v sérii (-) a e je elektrický náboj (C).

Rovnice zdroje fotoelektrického proudu lze vyjádřit jako [99, 100]

$$I_{ph} = I_{phn} (1 + K_I \cdot \Delta T) \frac{G}{G_n}, \quad (7.4)$$

kde I_{phn} je nominální fotovoltaický proud (A), K_I je teplotní koeficient proudu fotovoltaického modulu ($A \cdot K^{-1}$), ΔT představuje rozdíl teplot ($T - T_n$), G je intenzita slunečního záření ($W \cdot m^{-2}$) a G_n je nominální intenzita slunečního záření ($W \cdot m^{-2}$). Například v [101] je pro matematický popis fotovoltaického modulu uvažována rovnost proudu nakrátko I_{sc} a fotovoltaického proudu I_{ph} . Podle [100] není nutné zavádět toto zjednodušení a využije se následující závislosti

$$I_{phn} = \frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} I_{scn}, \quad (7.5)$$

kde I_{scn} je nominální proud nakrátko fotovoltaického modulu (A). Sériový a paralelní odpor fotovoltaického modulu představují takzvané parazitní odpory, které způsobují pouze ztrátu napětí a proudu. Sériový odpor představuje několik dílčích odporů, jako například odpor kontaktů, substrátu či o odpor plošný, mřížkový a sběrníkový. Velikost sériového odporu je pak významně ovlivněna zejména odpory (ztrátami) vrstev a kontaktů, kterými je generovaný proud jímán pro vnější elektrický obvod. Pokud je hodnota sériového odporu vysoká, dojde k významné redukci proudu nakrátko. Za ideálních podmínek je hodnota sériového odporu velmi malá a hodnota paralelního odporu je velmi vysoká [99]. U reálného článku se však tyto odpory uplatňují a ovlivňují průběh I-V charakteristiky. Některé odborné publikace [42] pak ani hodnotu paralelního odporu neuvažují. Paralelní odpor je ale veden celou strukturou fotovoltaického článku a respektuje svody s ohmickým charakterem [95]. Je-li hodnota paralelního odporu příliš nízká, s největší pravděpodobností se jedná o vadný článek, jež se vyznačuje vlastnostmi, jako by byl zevnitř zkratován.

Proud, který vzniká difúzí nosičů náboje a rekombinací v oblasti prostorového náboje, je na Obr. 7.2 vyjádřen diodou s konkrétním faktorem kvality (ideality) diody. Jinou možností je zavést ekvivalentní elektrický obvod se dvěma diodami [95]. Následující Tab. 7.2 [101] ukazuje hodnoty faktorů kvality diody pro jednotlivé typy fotovoltaických modulů.

Tab. 7.2: Přehled faktorů kvality diody pro jednotlivé typy průmyslově vyráběných fotovoltaických článků [101]

Typ	Faktor kvality diody n (-)
Monokrystalický Si	1,2
Polykrystalický Si	1,3
Amorfní Si	1,8
Tandemový	3,3
CdTe, CIS	1,5
AsGa	1,3

Saturační (nasycený) proud I_0 a nominální saturační proud I_{0n} jsou závislé na teplotě modulu a jsou definovány následujícími dvěma rovnicemi [42, 102]

$$I_0 = I_{0n} \left(\frac{T}{T_n} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left[\frac{e \cdot E_g}{n \cdot k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (7.6)$$

kde I_{0n} je nominální saturační proud (A), T_n je nominální teplota fotovoltaického modulu (K) a E_g je energie zakázaného pásma polovodiče (eV). Přesnější hodnoty energie zakázaného pásma je možné dosáhnout respektováním konkrétního rozsahu teplot modulu [100].

$$I_{0n} = \frac{I_{scn}}{\exp \left(\frac{V_{ocn}}{n \cdot V_{tn} - 1} \right)} \quad (7.7)$$

kde V_{ocn} je nominální napětí naprázdno fotovoltaického modulu (V) a V_{tn} je nominální tepelné napětí (V). Nominální elektrické parametry fotovoltaického modulu jsou stanoveny za standardních testovacích podmínek (STC), jež jsou charakterizovány nominální intenzitou slunečního záření $G_n = 1.000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, nominální teplotou fotovoltaického modulu $t_n = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ a hustotou vzduchu AM 1,5. Doplnující elektrické parametry modulu jsou stanoveny při běžné provozní teplotě fotovoltaického modulu (NOCT), které je dosaženo při intenzitě slunečního záření $G = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, teplotě okolí $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, hustotě vzduchu AM 1,5 a rychlosti větru $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Teplotní závislost, kterou popisuje rovnice (7.4) je možné aplikovat i na proud nakrátko fotovoltaického modulu [?, 100]

$$I_{sc} = I_{scn} (1 + K_I \cdot \Delta T) \frac{G}{G_n}, \quad (7.8)$$

a dle [?, 99, 100] lze popsat závislost pro napětí naprázdno

$$V_{oc} = V_{ocn} (1 + K_V \cdot \Delta T), \quad (7.9)$$

kde K_V je teplotní koeficient napětí fotovoltaického modulu ($\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$). Rovnice (7.8) a (7.9) využívají teplotní koeficienty proudu a napětí, jejichž rozmezí pro jednotlivé typy fotovoltaických modulů jsou v následující Tab. 7.3 [90, 95].

Tab. 7.3: Teplotní koeficienty jednotlivých typů průmyslově vyráběných fotovoltaických modulů [90, 95]

Typ modulu	Teplotní koeficient $K_V\%$ ($\% \cdot \text{K}^{-1}$)	Teplotní koeficient $K_I\%$ ($\% \cdot \text{K}^{-1}$)
Krystalický Si	-0,55 až -0,30 [90]	0,02 až 0,08 [90]
Amorfni Si	-0,50 až -0,19 [95]	0,01 až 0,10 [95]
CdTe	-0,43 až 0,22 [95]	0,02 až 0,08 [95]
CIS	-0,50 až -0,26 [95]	0,01 až 0,10 [95]
HIT	-0,29 až -0,22 [90]	0,02 až 0,04 [90]

7.4 Stanovení sériového a paralelního odporu

Z ekvivalentního obvodu na Obr. 7.2 je zřejmé, že velikost sériového odporu nemá vliv na napětí naprázdno fotovoltaického modulu. Přesto velmi výrazně ovlivňuje maximální výkon modulu P_{max} a jeho faktor plnění (FF) [95]. Význam faktoru plnění je objasněn dále v textu. Proti tomu, při vysokých intenzitách slunečního záření má velikost hodnoty paralelního odporu vliv zejména na napětí naprázdno. Částečně se vyznačuje i ovlivněním proudu nakrátko. O vlivu na proud nakrátko se uvažuje jen v případě, že se modul disponuje vysokým paralelním odporem a zároveň je vystaven vysokým intenzitám záření. Sériový a paralelní odpor každopádně představují důležité elektrické parametry fotovoltaického modulu. Jsou-li tyto hodnoty známy, rovnice (7.2) vede na diferenciální rovnici prvního řádu. I když hodnoty odporů nejsou výrobcem článků uváděny a nejsou součástí štítkových hodnot, existuje řada postupů jejich stanovení [100]. Podle [100] jde často o vyjádření, která jsou založena na empiricky stanovených vztazích plynoucích z experimentálně měřených dat. Jiným uvedeným přístupem je kombinace experimentálně změřených dat s iteračními metodami. Jejich kombinace spočívá v porovnávání experimentálně stanovené I-V charakteristiky s matematicky vypočtenou charakteristikou. Ta využívá postupné inkrementace sériového odporu do té doby, než se zajistí požadovaná shodnost. Obdobně se stanoví i hodnota paralelního odporu. Tento přístup je poměrně nepřesný, jelikož by inkrementace neměla probíhat odděleně [100]. V [103] je uvažován také jen sériový odpor, který není navíc vyčíslen. V [42] se výpočet sériového odporu realizuje také pomocí štítkových hodnot fotovoltaického modulu. Samotný výpočet je zjednodušený, jelikož neuvažuje paralelní odpor.

Pro stanovení velikosti odporů práce použila upravenou metodu výpočtu z [100]. Metoda vychází z předpokladu rovnosti maximálních výkonů fotovoltaického článku při STC, konkrétně výkonu vypočteného matematicky $P_{max,m}$ a výkonu získaného přímo z údajů ze štítku P_{max} . Maximální výkon fotovoltaického článku lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu, který obsahuje známé štítkové parametry, přičemž i samotný výkon je štítkový parametr.

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}, \quad (7.10)$$

kde P_{max} je maximální výkon fotovoltaického modulu (W), V_{pm} je napětí fotovoltaického modulu při maximálním výkonu (V) a I_{pm} je proud fotovoltaického modulu při maximálním výkonu (A). Podrobnější vyjádření maximálního výkonu reflektující STC je možné získat kombinací rovnic (7.2) a (7.10)

$$P_{max} = V_{mp} \left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_{sr}}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_{sr}}{R_{shr}} \right\} \quad (7.11)$$

kde R_{sr} je sériový odpor fotovoltaického modulu při STC (Ω) a R_{shr} je paralelní odpor fotovoltaického modulu při STC (Ω). Z důvodu výpočtu maximálního matematického

výkonu $P_{max,m}$, případně jednotlivých odporů fotovoltaického modulu, jsou na rovnici (7.11) aplikovány iterační metody. Aplikace se vede takovým způsobem, aby byl nalezen právě jeden pár $\{R_{sr}, R_{shr}\}$, který splňuje podmínku rovnosti výkonů P_{max} a $P_{max,m}$ a současně respektuje další parametry fotovoltaického modulu. Zmíněné předpoklady vedou ke skutečnosti, že hledané odpory v rovnici (7.11) představují jediné neznámé veličiny, tudíž lze paralelní odpor vyjádřit následovně

$$R_{shr} = \frac{V_{mp} (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_{sr})}{V_{mp} \cdot I_{ph} - V_{mp} \cdot I_0 \cdot \exp \left[\frac{(V_{mp} + I_{mp} \cdot R_{sr})}{N_s \cdot a} \cdot \frac{e}{k \cdot T} \right] + V_{mp} \cdot I_0 - P_{max}}, \quad (7.12)$$

kde $P_{max,m}$ je matematicky stanovený maximální výkon fotovoltaického modulu (W). Vzhledem k tomu, že metoda využívá iteračních metod, je konečné řešení odvislé od předem zvolené přesnosti výpočtu ϵ_{er} . Ta vyjadřuje míru difference mezi P_{max} a $P_{max,m}$. Následující Tab. 7.4 vyčísluje jednotlivé veličiny použité pro stanovení odporů fotovoltaického modulu.

Tab. 7.4: Vstupní parametry použité pro stanovení sériového R_{sr} a paralelního odporu R_{shr} fotovoltaického modulu při standardních testovacích podmínkách

Parametr	Označení	Velikost	Jednotka
Maximální výkon modulu	P_{max}	235,00 [104]	W
Napětí panelu při maximálním výkonu	V_{mp}	29,80 [104]	V
Proud panelu při maximálním výkonu	I_{mp}	7,89 [104]	A
Nominální napětí naprázdno modulu	V_{ocn}	36,90 [104]	V
Nominální proud nakrátko modulu	I_{scn}	8,55 [104]	A
Teplotní koeficient napětí	K_V	$-1,13 \cdot 10^{-1}$ [104]	$V \cdot K^{-1}$
Teplotní koeficient proudu	K_I	$5,13 \cdot 10^{-3}$ [104]	$A \cdot K^{-1}$
Počet fotovoltaických článků v sérii	N_s	60 [104]	-
Energie zakázaného pásma polovodiče	E_g	1,12 [1]	eV
Faktor kvality diody	n	1,3	-
Nominální absolutní teplota modulu	T_n	298,15	K
Elektrický náboj	e	$1,60217646 \cdot 10^{-19}$	C
Boltzmannova konstanta	k	$1,3806503 \cdot 10^{-23}$	$J \cdot K^{-1}$
Nominální intenzita záření	G_n	1.000	$W \cdot m^{-2}$
Přesnost výpočtu	ϵ_{er}	0,001 [100]	-

Na základě výpočtu byl ustanoven sériový odpor $R_{sr} = 0,205 \Omega$ a paralelní odpor $R_{shr} = 274,96 \Omega$. Stanovení sériového a paralelního odporu při STC je možné realizovat, také přímo z I-V charakteristiky, kdy se respektují následující závislosti

$$-R_{sr} = \frac{dU}{dI}, \quad (7.13)$$

kde dU je změna napětí (V) a dI je změna proudu (A).

$$-\frac{1}{R_{shr}} = \frac{dI}{dU}, \quad (7.14)$$

Lze konstatovat, že při výrazném odchýlení hodnot odporů od ideálního stavu se I-V charakteristika stává více lineární, což vede k redukcí účinnosti fotovoltaického modulu obecně. Pro vyčíslené hodnoty odporů je dále nutné uvažovat, že změnou teploty fotovoltaického modulu dochází také ke změně velikostí těchto odporů. Například v [42] je v matematickém modelu uvažována pouze konstantní hodnota sériového odporu a paralelní odpor se nebere v úvahu. Následující rovnice popisují teplotní závislosti jednotlivých odporů [102].

$$R_s = R_{sr} \left(\frac{T}{T_n} \right)^\delta, \quad (7.15)$$

kde δ je teplotní koeficient pro sériový odpor (-).

$$R_{sh} = R_{shr} \left(\frac{T}{T_n} \right)^\phi, \quad (7.16)$$

kde ϕ je teplotní koeficient pro paralelní odpor (-).

7.5 Matematický model fotovoltaického modulu

Model fotovoltaického modulu je založen na matematickém popisu (7.2) - (7.16) a na komentářích uvedených výše. Model je vytvořen v MATLAB[®]/Simulink a pro simulaci se využije základních vstupních parametrů uvedených v Tab. 7.4 a Tab. 7.5. Na rozdíl od ostatních publikací v sobě model spojuje upravený výpočet sériového a paralelního odporu přímo ze štítkových hodnot a současně respektuje i jejich teplotní závislost. Verifikace modelu je realizována pro standardní testovací podmínky a dále pro různé intenzity slunečního záření a pro různé provozní teploty modulu.

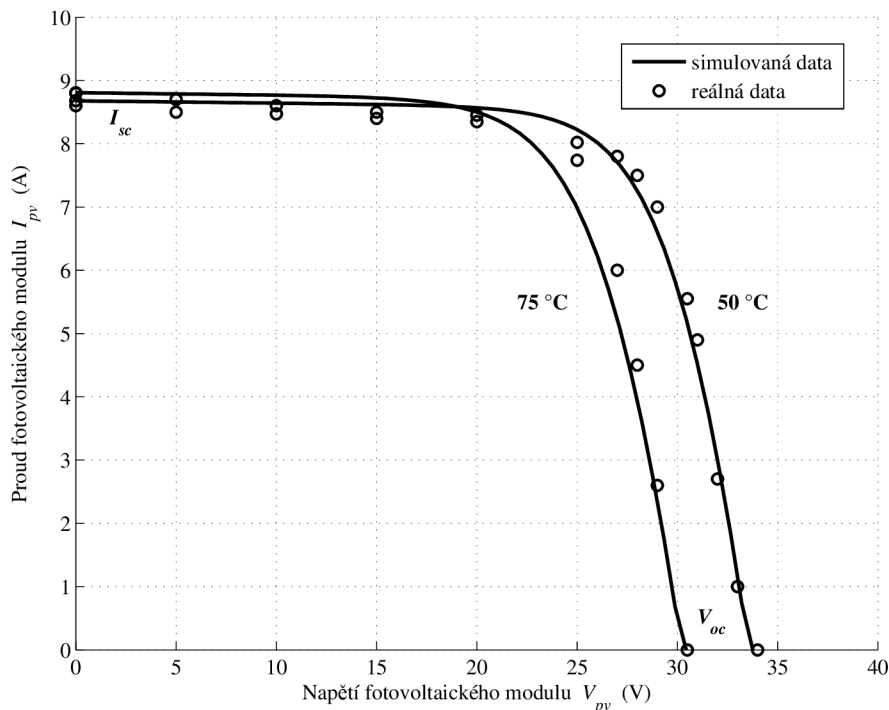
Tab. 7.5: Doplnující vstupní parametry použité pro simulaci fotovoltaického modulu

Parametr	Označení	Velikost	Jednotka
Paralelní odpor modulu při STC	R_{shr}	274,96	Ω
Teplotní koeficient pro R_{shr}	ϕ	0,0 [102]	-
Sériový odpor modulu při STC	R_{sr}	0,205	Ω
Teplotní koeficient pro R_{sr}	δ	5,0 [102]	-

7.5.1 Verifikace modelu na změny provozní teploty

Jmenovité hodnoty fotovoltaických modulů jsou měřeny při standardizovaných podmínkách. Součástí těchto podmínek je i konstantní teplota 25 °C. Problémem je, že

u FVE nelze zajistit, aby jednotlivé moduly dosahovaly během provozu pouze této teploty. Reálná teplota modulu má přitom vliv na jeho elektrické vlastnosti a ovlivní i samotný průběh I-V charakteristiky, jakož i polohu jeho pracovního bodu [105]. Ve skutečnosti mohou povrchové teploty modulů dosahovat až přes 50 °C. Následující Obr. 7.3 [28] přináší porovnání I-V charakteristik reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro jeho různé provozní stavy.



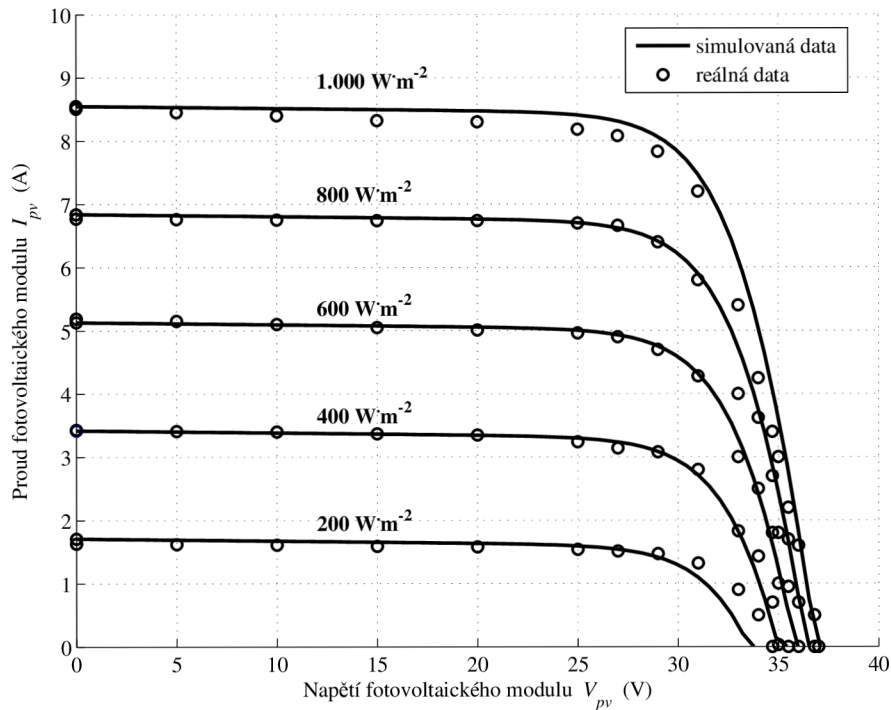
Obr. 7.3: Porovnání I-V charakteristik reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro provozní teploty 50 °C a 75 °C při intenzitě slunečního záření $1.000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (modifikováno z [28])

Grafické výsledky na Obr. 7.3 [28] verifikují matematický model z pohledu změny provozní teploty fotovoltaického modulu. Dále je demonstrován teoretický předpoklad [105], že při zvýšení teploty modulu dochází k dominantnímu poklesu napětí naprázdno a k mírnému nárůstu proudu nakrátko. Značné zvýšení teploty modulu způsobí pokles dodávaného výkonu. Vliv změny teploty na výsledné hodnoty proudu nakrátko a napětí naprázdno je zřejmý také na základě velikosti teplotních koeficientů z Tab. 7.3 [90], [95]. Stanovení teplotních koeficientů pomocí lineární aproximace bylo autorem představeno v [106], kde byl simulován fotovoltaický modul, který neměl jednotlivé koeficienty uvedeny mezi štítkovými hodnotami.

7.5.2 Verifikace modelu na změny intenzity slunečního záření

Obecně je výkon vyráběný FVE během dne ovlivňován zejména změnou intenzity slunečního záření. Velikost intenzity slunečního záření, která dopadá na aktivní plo-

chu fotovoltaických modulů, je závislá na několika skutečnostech (úhel sklonu modulu, nadmořská výška, průchodnost atmosféry a jiné). Na druhou stranu samotná změna intenzity má významný vliv na elektrické parametry fotovoltaického modulu [105]. Na Obr. 7.4 [28] je provedeno porovnání I-V charakteristik reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro různé intenzity ozáření při provozní teplotě modulu 25 °C.



Obr. 7.4: Porovnání I-V charakteristik reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro různé intenzity slunečního záření při provozní teplotě modulu 25 °C (modifikováno z [28])

Výsledky potvrzují ověření modelu, neboť dle Obr. 7.4 [28] proudy nakrátko se shodují a jednotlivé průběhy charakteristik spolu také korespondují. Maximální relativní chyba modelu byla zaznamenána pro krajní část charakteristiky při intenzitě ozáření 200 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, kdy se simulované napětí naprázdno lišilo o 1,31 %. Obr. 7.4 [28] demonstruje závislost výstupního proudu fotovoltaického modulu na úrovni dopadající intenzity slunečního záření. Jednotlivé charakteristiky potvrzují teoretické předpoklady vycházející z rovnic (7.2), (7.4) a (7.9). Za předpokladu, že světelné spektrum a teplota modulu jsou neměnné, lze konstatovat, že při významné změně intenzity slunečního záření se významně změní i proud nakrátko. Napětí naprázdno při této změně zůstává stejné [105]. Výstupní napětí modulu je tak mnohem méně závislé na změně intenzity slunečního záření než výstupní proud. Matematický model v oblasti napětí naprázdno vykazuje vyšší relativní chybovost.

7.5.3 Stanovení faktoru plnění

Jedním z kvalitativních parametrů fotovoltaického modulu je takzvaný faktor plnění FF , který svým způsobem představuje jeho elektrickou účinnost. Jak ukazuje následující vyjádření, faktor plnění představuje poměr maximálního výkonu modulu k součinu jeho napětí naprázdno a proudu nakrátko [107].

$$FF = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (7.17)$$

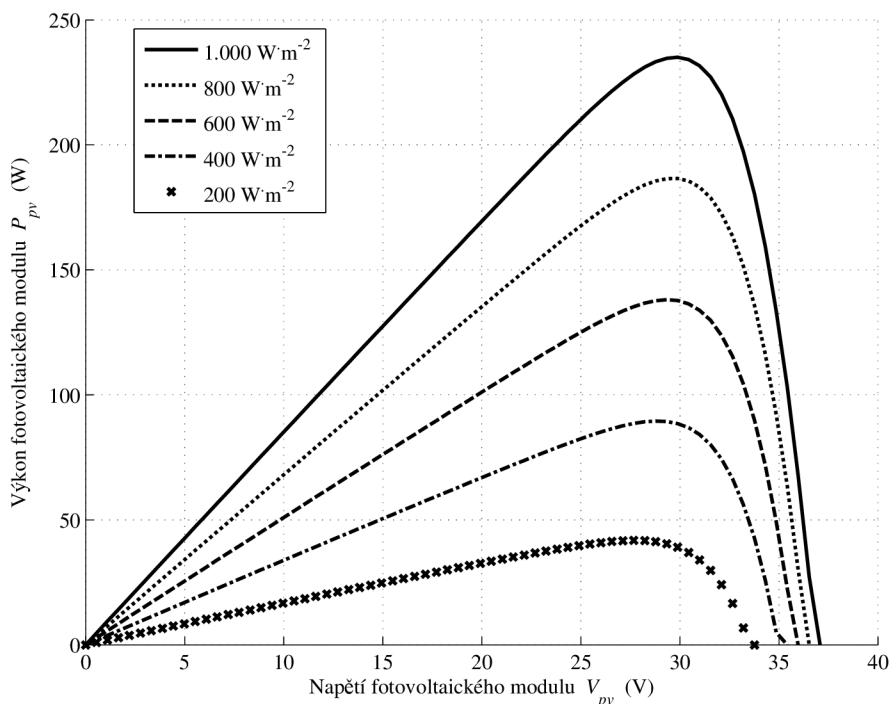
kde FF je faktor plnění (-), V_{pm} je napětí fotovoltaického panelu při maximálním výkonu (V) a I_{pm} je proud fotovoltaického panelu při maximálním výkonu (A). V následující Tab. 7.6 [28] je vyjádřena konfrontace faktorů plnění reálného a simulovaného fotovoltaického modulu během různých provozních podmínek a dosahovaná chybovost matematického modelu.

Tab. 7.6: Porovnání faktorů plnění reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro různé provozní podmínky [28]

G ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	t_{op} ($^{\circ}\text{C}$)	FF_r (-)	FF_s (-)	Relativní chyba (%)
1.000	25,0	0,7452	0,7412	0,5379
800	47,9	0,7219	0,7212	0,0876

Podle Tab. 7.6 [28] faktory plnění reálného a simulovaného fotovoltaického modulu během STC spolu téměř korespondují a relativní chyba dosahuje 0,5379 %. Obdobně je tomu i pro další analyzované provozní podmínky modulu, kdy je dosaženo chyby 0,0876 %. Dosažené hodnoty jednotlivých faktorů plnění přesahují hodnotu 0,7. Pokud se hodnota faktoru plnění pohybuje kolem 0,7 při STC [108], lze z tohoto úhlu pohledu považovat modul za kvalitní. Vzhledem k tomu, že elektrické vlastnosti fotovoltaického modulu degradují v čase, mohou hodnoty faktoru plnění nižší než 0,7 znamenat, že se jedná o starý modul, kdy již došlo k postupnému nárůstu jednotlivých parazitních odporů. Jedná se zejména o redukci vlivem zvýšení hodnoty sériového odporu [28]. Avšak nízká hodnota faktoru plnění nevypovídá vždy jen o stáří modulu. Faktor plnění je závislý na celé řadě aspektů, jež souvisejí hlavně s technologickou kvalitou výroby modulu (jako například morfologie materiálu, kvalita kontaktů a jiné) a představuje obecně kvalitativní parametr nového fotovoltaického modulu. Účelem porovnání faktorů plnění však nebyla analýza kvality provedení fotovoltaického modulu, nýbrž snaha doplnit verifikaci matematického modelu.

Následující Obr. 7.5 ukazuje průběh P-V charakteristik simulovaného fotovoltaického modulu pro různé intenzity slunečního záření. Jednotlivé P-V a I-V charakteristiky fotovoltaického modulu jsou obecně vzájemně závislé. Z pohledu I-V charakteristik je dle Obr. 7.4 model již verifikován na změnu intenzity slunečního záření, proto Obr. 7.5



Obr. 7.5: P-V charakteristiky simulovaného fotovoltaického modulu pro různé intenzity slunečního záření při provozní teplotě modulu $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (modifikováno z [28])

pouze demonstruje výkonové možnosti modulu. Navíc lze konstatovat, že maximální výkon simulovaného fotovoltaického modulu je totožný s výkonem reálného modulu, pouze se liší o přesnost výpočtu ϵ_{er} . Matematický model totiž využívá pro výpočet odporů modulu metodu představenou v podkapitole 7.4, jež vychází právě z rovnosti výkonů.

7.5.4 Aplikace verifikovaného modelu

Vytvořený matematický model fotovoltaického modulu byl využit jako podpůrný prostředek při vzniku funkčního vzorku laboratorního měřicího setu pro analýzu nízkovýkonových fotovoltaických modulů. Verifikace tohoto měřicího setu byla realizována pro různé atmosférické podmínky a zejména na základě verifikovaného matematického modelu. Součástí verifikace bylo stanovení i hodnot sériového a paralelního odporu fotovoltaického modulu. Měřicí set slouží pro základní analýzu primárních a sekundárních veličin fotovoltaických modulů malých rozměrů a umožňuje modifikaci vybraných vstupních atmosférických parametrů. Samotná analýza je realizována pomocí aplikace vytvořené v LabViewTM. Podrobnější informace o měřicím setu jsou uvedeny v [106], kde jsou rovněž představeny provedené experimenty. Doplnující informace jsou uvedeny v [109].

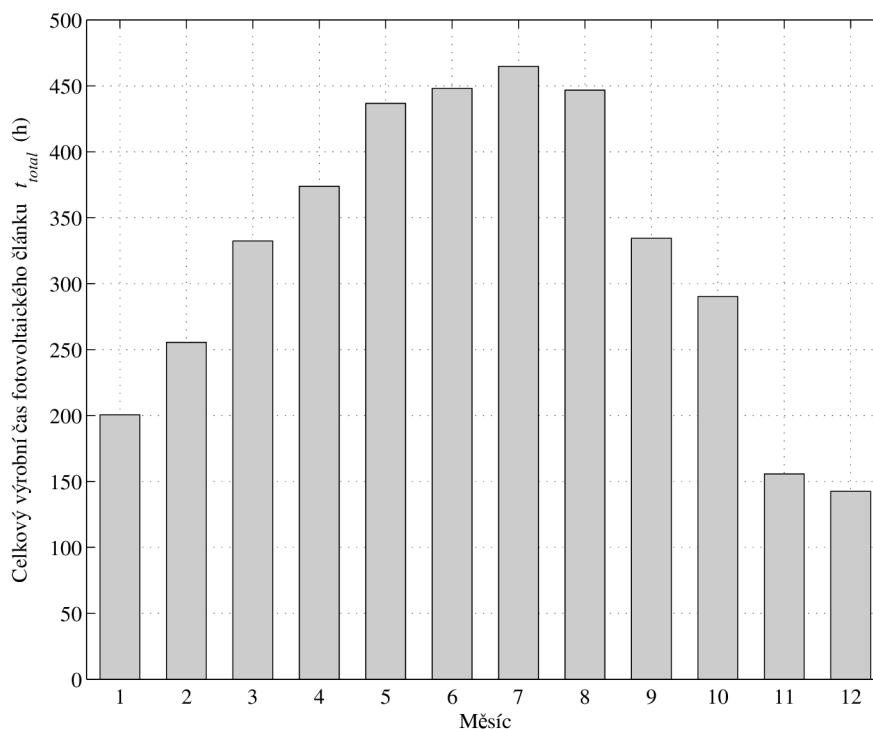
7.6 Výkonová dostupnost a vhodnost veřejných databází

Prvotním úkolem návrhu hybridního systému grid-off je stanovení výkonových možností jednotlivých, zejména primárních, zdrojů energie v závislosti na jejich geografické poloze a tomu odpovídajících atmosférických podmínkách. Primární zdroje budou sloužit k napájení proměnné zátěže, která bude velikostí spotřeby energie ekvivalentní s výkonovými možnostmi systému. Provoz fotovoltaického subsystému v hybridním systému je řízen řídicím systémem. Je-li fotovoltaický subsystém primárním zdrojem tohoto systému, musí být schopen zajistit výrobu dostatečného množství elektrické energie, a to i při nepříznivých atmosférických podmínkách. Dosahuje se toho redundancí výrobní kapacity, snížením výkonových požadavků zátěže, upravením řídicího algoritmu, akumulací a dalšími postupy.

Pro konkrétní lokalitu je vhodné zpracovat nejprve analýzu výkonové dostupnosti. U hodnocení provozu fotovoltaického článku není vyžadováno měření veličin po celých 24 hodin. Měření proto probíhá v časovém rozmezí od 6 hodin do 21 hodin (tj. 15-ti hodinový interval), kdy byla zjištěna schopnost systému stále vyrábět energii. Pro získání vypovídající hodnoty měřených veličin, jsou jednotlivé hodnoty zaznamenávány každé 2 minuty, a to ve formě databázových souborů. Samotná výkonová dostupnost je analyzována na vzorku dat získaných během jednorozměrného kontinuálního měření elektrických a neelektrických parametrů fotovoltaického článku (maximální výkon 100 W) instalovaného v lokalitě Brno (GPS 49° 11' 53" N; 16° 35' 32" E) v roce 2008. Měřená sestava je vybavena několika dalšími přístroji a měřicími čidly důležitých parametrů, které plně charakterizují provoz subsystému. Technická specifikace použitých přístrojů a zařízení je uvedena v [110].

Vzhledem k charakteru požadovaných výstupů analýzy pracuje fotovoltaický modul v zapojení pouze s akumulátorovou baterií. Během měření je tak zaznamenáván okamžitý výkon článku, který je kvantifikován právě pro spojení článek - akumulátorová baterie, a pomocí pyranometru se měří intenzita slunečního záření dopadajícího na článek. Z pohledu analýzy jsou tyto veličiny považovány za primární veličiny a jsou hlavním předmětem hodnocení. Měřená intenzita odpovídá intenzitě slunečního záření v rozsahu vlnových délek od 300 nm do 5.000 nm a spektrální citlivost pyranometru je konstantní pro celý frekvenční rozsah [87].

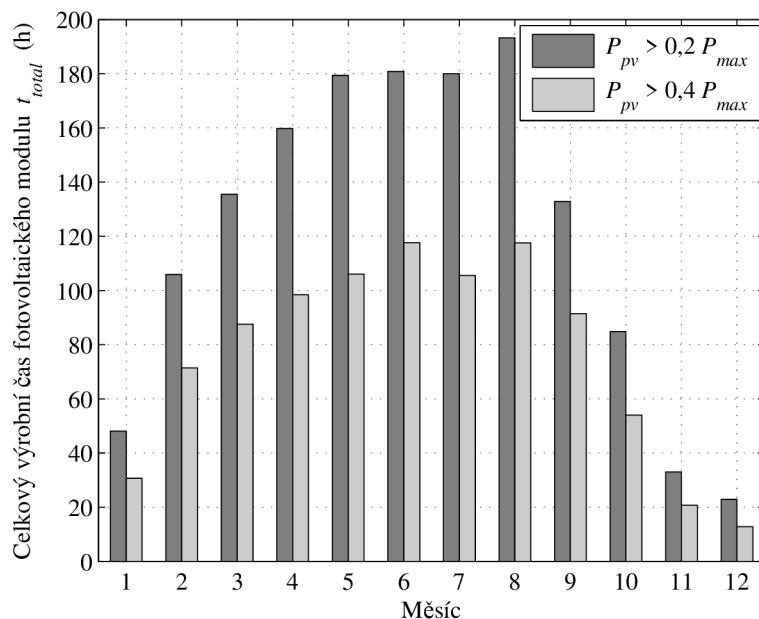
Dále se měří teplota okolí nebo teplota fotovoltaického modulu na jeho vrchní straně bez efektu stínění. Tyto teploty představují pomocné veličiny a slouží k doplnění interpretace dosažených výsledků. V blízké budoucnosti mohou posloužit i k rozšíření analýzy. Obr. 7.6 [2] ilustruje celkové časy pro jednotlivé měsíce, kdy je modul schopen dodávat elektrickou energii. Hodnota celkového času pro daný měsíc tak byla získána sumarizací pouze těch časových intervalů, kdy byl výkon modulu nenulový. Ukazuje také, že nejvyšší doby výroby jsou v letních měsících (červen, červenec a srpen). Maximální doba výroby je v měsíci červenec, kdy byl fotovoltaický modul schopen vyrábět



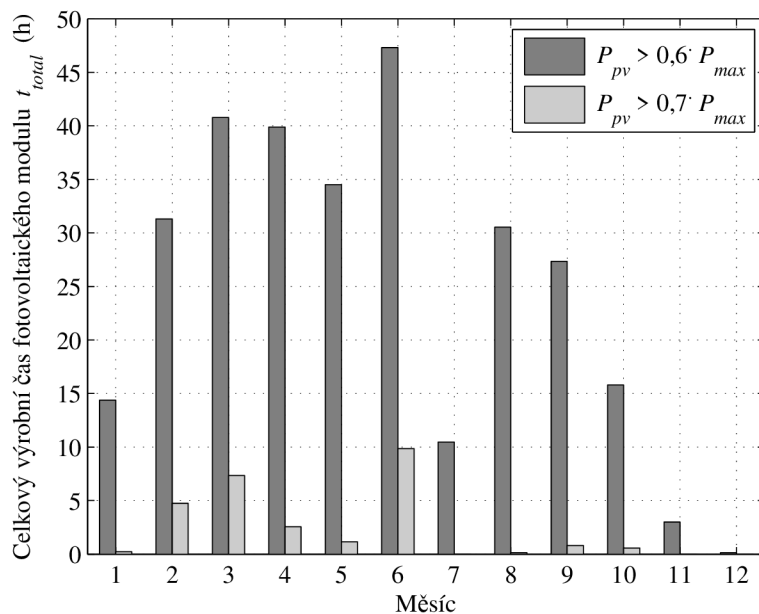
Obr. 7.6: Celková doba produkce elektrické energie fotovoltaického modulu pracujícího ve spojení s akumulátorovou baterií v jednotlivých měsících (modifikováno z [2])

přibližně 465 hodin. Uváží-li se počet dní v tomto měsíci, zjednodušeně lze říci, že elektrická energie je vyráběna téměř 15 hodin denně. Tato doba odpovídá celému jednodennímu měřenému intervalu. Uvedená interpretace ovšem neznamená, že celková vyrobená energie v tomto měsíci musela být nejvyšší. Celkový čas vyjadřuje pouze stav systému, kdy produkoval elektrickou energii. Dále je nezbytné uvést, že hodnota celkového času pro měsíc listopad je pouze informativní, poněvadž v tomto měsíci došlo k několikadennímu výpadku na měřícím systému. Doba výroby je v tomto období zkreslená. Podle vývoje meteorologických podmínek by ovšem svojí hodnotou nepřesáhla hodnotu z předchozího měsíce a neklesla pod hodnotu následujícího měsíce [2]. Na základě toho je získána obecná představa výrobních možností, avšak z pohledu reálného provozu fotovoltaického zdroje není úplně relevantní, jelikož okamžitá hodnota slunečního záření je značně proměnlivá.

Následující Obr. 7.7 [2] a Obr. 7.8 [2] mnohem lépe demonstrují výkonovou dostupnost, když ukazují celkové časy dosažené překročením specifické procentní minimální hodnoty výkonu modulu. I zde platí, že údaje pro měsíc listopad mají informativní charakter z důvodu uvedeného výše. Obr. 7.7 [2] a Obr. 7.8 [2] jsou výsledkem analýzy ve vytvořené aplikaci v programu MATLAB[®]. Koncept aplikace je, že pro libovolně vybrané časové období a požadovaný výkon zpracovává databázi reálně měřených dat a provádí její analýzu. Analýzou změřených dat lze vyhodnotit například celkovou dobu, po kterou byl fotovoltaický modul schopen dodávat konkrétní hodnotu minimálního vý-



Obr. 7.7: Celková doba výroby elektrické energie fotovoltaického modulu v jednotlivých měsících při překročení specifických výkonů $P_{pv} > 0,2 \cdot P_{max}$ a $P_{pv} > 0,4 \cdot P_{max}$ (modifikováno z [2])



Obr. 7.8: Celková doba výroby elektrické energie fotovoltaického modulu v jednotlivých měsících při překročení specifických výkonů $P_{pv} > 0,6 \cdot P_{max}$ a $P_{pv} > 0,7 \cdot P_{max}$ (modifikováno z [2])

konu za vybrané období. Při porovnání celkových časů v měsíci červenec z Obr. 7.7 [2] a Obr. 7.8 [2] je možné pozorovat, že přestože v tomto měsíci je celková doba nejdelší (viz. Obr. 7.6 [2]), výkonový potenciál už nejvyšší není. Nejvyšší celková doba je tvořena vysokým podílem doby, kdy výkon nepřekročil $0,2 \cdot P_{max}$ a $0,4 \cdot P_{max}$. Výkonově

příznivěji tak vychází červen, který má jednoznačně vyrovnanější výkonovou bilanci. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že hlavní nedostatek fotovoltaických zdrojů energie je v neschopnosti dodávat konstantní elektřinu nezávisle na denní době nebo ročním období jednoho roku. Podle Obr. 7.6 [2], Obr. 7.7 [2] a Obr. 7.8 [2] se v zimních měsících získá podstatně méně elektrické energie než v letních měsících. Pokud by byl grid-off systém napájen pouze fotovoltaickým modulem, je třeba, aby byl systém dimenzován podle měsíce prosince, během kterého bylo modulem vyrobeno nejméně elektrické energie, a to přibližně 1.273 Wh. Tato úvaha by však vedla k předimenzování celého systému pro provoz v dalších měsících. Porovnání výkonové dostupnosti měsíců s nejnižším a nejvyšším množstvím vyrobené energie je v Tab. 7.7 [2].

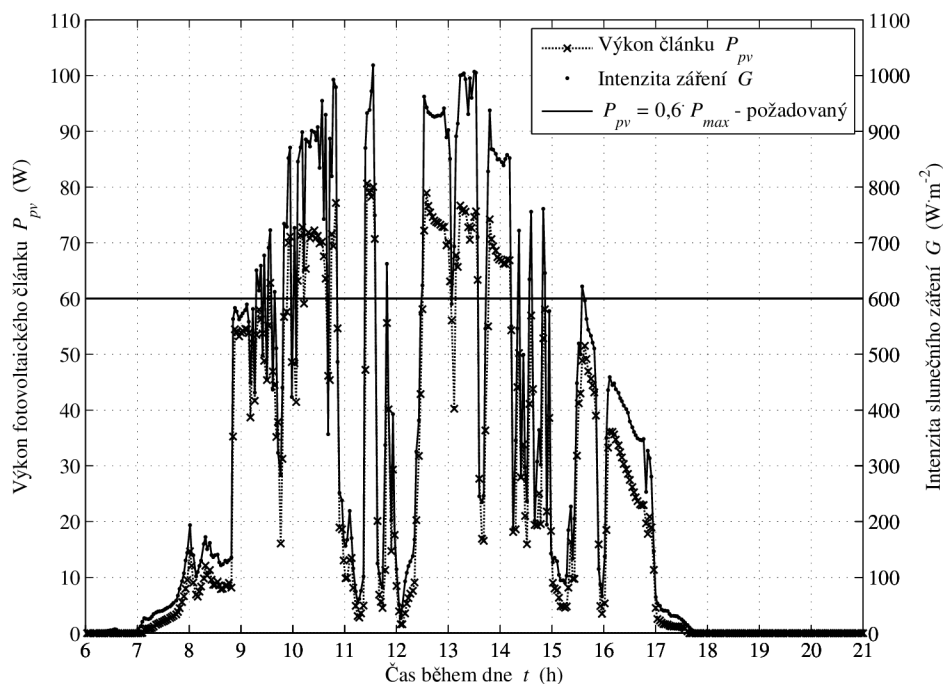
Tab. 7.7: Výkonový potenciál fotovoltaického modulu během června a prosince [2]

Období	E_{month} (W·h)	$t_{total,20}$ (h)	$t_{total,40}$ (h)	$t_{total,60}$ (h)	$t_{total,70}$ (h)
Červen	10.316,88	180,87	117,62	47,32	9,85
Prosinec	1.272,85	22,88	12,8	0,12	0,00

Výsledky v Tab. 7.7 [2] ukazují, že v prosinci je vyrobeno přibližně o 88 % méně elektrické energie než v červnu. Fotovoltaický modul je navíc v červnu provozován přes 47 hodin s výkonem větším než je $0,6 \cdot P_{max}$. Oproti tomu v prosinci pouze přibližně 0,1 hodiny. Velikosti výkonů opět ukazují na skutečnost, že optimální podmínky výroby v lokalitě umístění modulu jsou v letních měsících. Na základě měření jsou známy konkrétní závislosti chování fotovoltaického subsystému, které jsou jedinečné pro místo, kde je systém umístěn.

Obr. 7.9 [2] ukazuje jeden z výstupů aplikace, je-li vybráno jednodenní měřené období a zvolena hodnota požadovaného výkonu jako $P_{pv} > 0,6 \cdot P_{max}$. Je zde ilustrována skutečnost, že intenzita slunečního záření se rychle zvyšuje v časných ranních hodinách a rychle snižuje v pozdních odpoledních hodinách, což koreluje i s průběhem okamžitého výkonu fotovoltaického článku. Celoroční měření nedemonstruje jen skutečnost, že elektrická energie získaná z fotovoltaického zdroje je značně proměnná, ale změřená data intenzity slunečního záření a teploty okolí představují hlavně reálná vstupní data pro vytvořený matematický model fotovoltaického subsystému.

Pro získání vstupních hodnot lze využít i veřejně dostupných databází, které obsahují informace o rozložení intenzity slunečního záření a vývoji teploty pro zvolenou lokalitu během roku. V návaznosti na vyhodnocení výkonové dostupnosti je provedeno zhodnocení relevance využití takovéto databáze. Konkrétně je hodnocena databáze s názvem Fotovoltaický geografický informační systém (PVGIS), která byla vyvinuta Společným výzkumným centrem Evropské komise (JRC). Ze strany Evropské unie se jedná o řešení, které má přispět k navýšení podílu OZE v celkovém portfoliu vyroben



Obr. 7.9: Vykreslení měřených dat intenzity slunečního záření, okamžitého výkonu článku a zvolená hodnota požadovaného výkonu ze dne 18. března 2008

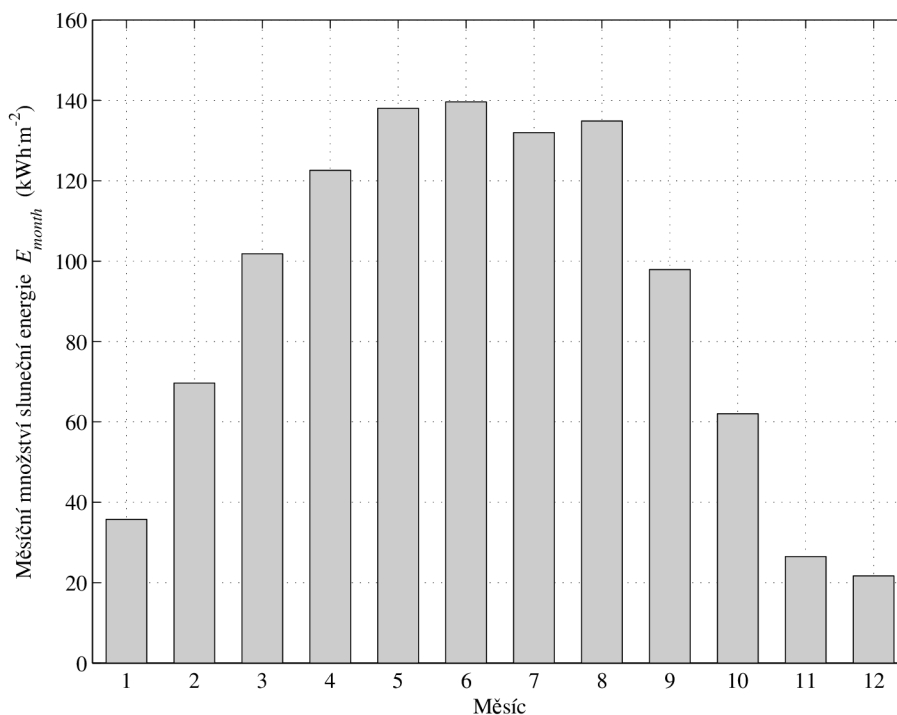
a má pomoci objektivnímu hodnocení jednotlivých finančních rámců právě do fotovoltaických technologií. Přesto, že hlavní motivací investorů do FVE je, a výhradně bude, návratnost investice, představuje PVGIS i technický podpůrný prostředek pro prvotní návrh FVE. Proto je vhodné se zabývat jeho relevancí. PVGIS představuje interaktivní mapu, která čerpá z dat získaných v období od 1981 až 1990 a je schopna pro zvolenou lokalitu poskytnout měsíční či roční průměrná množství slunečního záření na horizontálních a šikmých plochách [111]. Vhodnost PVGIS je ověřována porovnáním s reálně měřenými údaji. Ve vazbě na návrh FVE a hybridního systému je ideální následná kombinace PVGIS s informacemi o výkonové dostupnosti, tak lze dosáhnout komplexní představy o tom, jak správně dimenzovat a řídit hybridní systém jako celek. V budoucí práci má provedená analýza sloužit k lepšímu nastavení jednotlivých procesů řídicího algoritmu konkrétního hybridního systému obsahující fotovoltaický subsystém.

Měřená lokalita Brno v rámci České republiky vykazuje jedny z nejvyšších hodnot intenzit slunečního záření [87]. Relevance je ověřována konfrontací údajů z veřejné databáze s reálně měřenými daty. Změřená data intenzit slunečního záření jsou vytvořena aplikací v MATLAB[®] přepočtena na množství sluneční energie podle následujícího vztahu [87].

$$E = \int_{t_0}^{t_1} G(t_i) \Delta t_i \quad (7.18)$$

kde E je solární energie ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$), t_0 je počáteční doba (s) a t_1 je konečná doba (s) uvažovaného sledovaného časového intervalu.

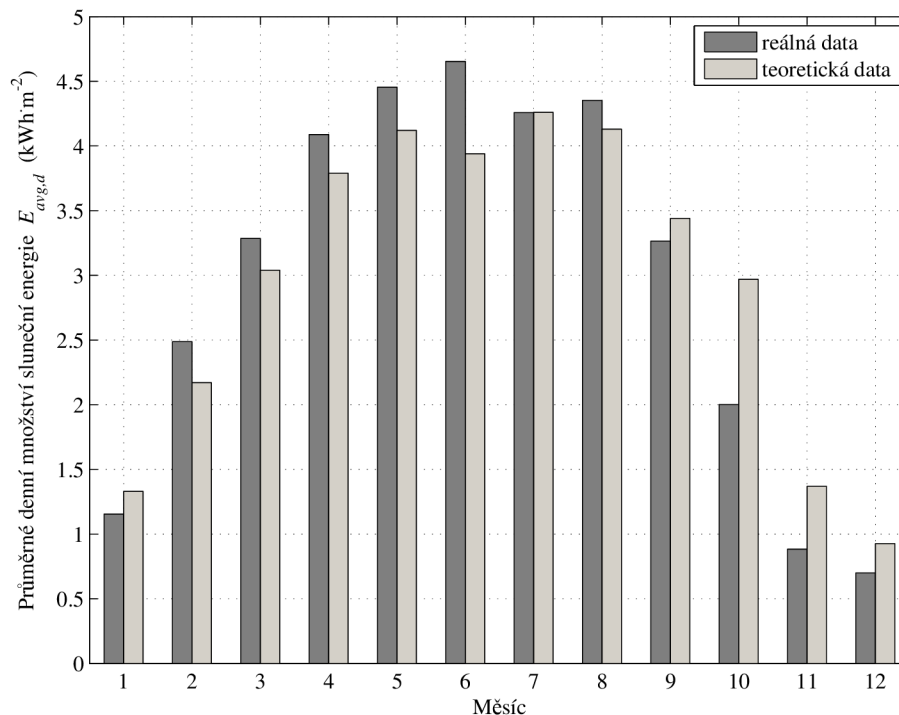
Porovnání průměrných ročních úhrnů globálního horizontálního záření je provedeno například v [112], kde jsou hodnocena data získaná z šesti dostupných databází (PVGIS, ESRA, HelioCliom-2, Meteonorm, NASA SSE a Satel-Light). Porovnání neslouží k identifikaci nejlepší databáze, což by stejně bylo irelevantní, ale poukazuje na vzájemné rozdíly. Obecně je dosahováno větších rozdílů v místech, kde je méně kvalitní a hustá síť meteorologických stanic, které poskytují vstupní data pro simulace. Výsledky ukazují, že rozdíly na regionální úrovni nepřekračují 7,0 % pro horizontální plochu a 8,3 % pro plochu se sklonem 34° [112]. Podle PVGIS [113] se pro lokalitu Brno, při uvažování nadmořské výšky 245 m n. m. a při zvoleném úhlu natočení 60° , pohybuje roční množství sluneční energie v rozmezí od $1.050 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ do $1.100 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Obr. 7.10 [87] ukazuje jednotlivá měsíční množství dopadající sluneční energie vypočtená dle (7.18) z měřených dat.



Obr. 7.10: Celkové množství sluneční energie dopadající na fotovoltaický modul během jednotlivých měsíců (modifikováno z [87])

Rozložení na Obr. 7.10 [87] opět potvrzuje skutečnost, že v rámci hybridního systému jsou optimální podmínky pro více dominantní roli fotovoltaického subsystému v letních měsících než v zimních měsících. Roční množství sluneční energie vypočtené z reálně měřených dat je $1.082,57 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Tato hodnota se pohybuje ve výše uvedeném rozmezí dle PVGIS. Roční množství energie představuje cennou informaci spíše v souvislosti s potenciálním finančním výnosem. Znalost této hodnoty je také dobrá pro základní představu dimenzování hybridního systému. Z tohoto pohledu se PVGIS jeví jako relativně vhodný.

Obr. 7.11 [87] přináší konfrontaci reálných a teoretických průměrných denních množství sluneční energie pro jednotlivé měsíce. Je-li pro návrh fotovoltaického zdroje



Obr. 7.11: Porovnání reálných a teoretických průměrných denních množství sluneční energie dopadající na fotovoltaický modul během jednotlivých měsíců (modifikováno z [87])

využito veřejných databází, získá se představa o vývoji hodnot jeho průměrné denní a měsíční produkce elektrické energie, a tomu odpovídajícího slunečního záření za dané období. Porovnání naměřených hodnot s hodnotami v databázi ukazuje, že jsou téměř identické a rozdíly jsou minimální. Významné rozdíly se vyskytují v říjnu a listopadu, protože systém měření byl přerušeno po dobu několika dnů v těchto měsících.

7.7 Simulace fotovoltaického subsystému

V návaznosti na vytvořený matematický model fotovoltaického modulu je analyzován fotovoltaický subsystém. Pro simulaci je využito reálně změřených dat intenzit slunečního záření a provozních teplot fotovoltaického modulu. Provozní teploty jednotlivých modulů se v simulaci uvažují stejné. Dále je zaveden zjednodušující předpoklad a neuvazuje se vliv zastínění některé z částí fotovoltaického pole. Matematická simulace je uskutečněna pro časový rámec jednodenního provozu subsystému. Simulace založená na reálných vstupních datech je pro názornost také porovnána s provozem, který využívá vstupní data odpovídající ideálním podmínkám. Ideální rozložení intenzity slunečního

záření během dne je možno realizovat například pomocí Gaussovy funkce [101]

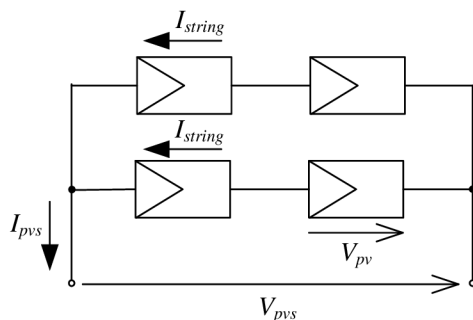
$$G(t) = G_n \cdot e^{-\frac{(t - t_{max})^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (7.19)$$

kde t_{max} je doba maxima křivky intenzity slunečního záření podle Gaussovy funkce (h) a σ je šířka křivky intenzity slunečního záření ve výšce $G_n \cdot e^{-\frac{1}{8}}$ Gaussovy funkce (h). Podle [101] je doba maxima t_{max} rovna 12 h a šířka křivky σ je volena 0,5 h. Na základě dlouhodobého měření intenzity slunečního záření se prokázalo, že pokud se využije Gaussovy funkce, je vhodné použít vyšší hodnotu šířky křivky σ , která lépe opisuje skutečný průběh. Nízká hodnota σ má za následek, že hodnoty intenzity na ideální křivce jsou nižší než jsou hodnoty reálně změřené. Tuto skutečnost potvrzují i informace z databáze PVGIS [113], která poskytuje pro zvolený měsíc průměrné denní hodnoty intenzit slunečního záření a teplot okolí. Pro ilustraci ideálního rozložení intenzity slunečního záření je využito následujícího vztahu, který představuje další alternativní přístup modelování.

$$G(t) = G_n \cdot \sin(\alpha), \quad (7.20)$$

kde α je úhel pro stanovení ideálního rozdělení intenzity slunečního záření ($^\circ$). V případě aplikace rovnice (7.20) je využita pouze kladná půlperioda funkce a je vhodné zvolena perioda a časový posun funkce, jejichž hodnoty se odvíjejí od konkrétního modelovaného dne.

Samotný model subsystému je koncipován jako fotovoltaické pole složené ze čtyř stejných polykrystalických modulů, jejichž parametry jsou obdobné s těmi uvedenými v Tab. 7.4 a Tab. 7.5. Na dalším Obr. 7.12 je ilustrována uvažovaná koncepce subsystému.



Obr. 7.12: Zjednodušené schéma fotovoltaického subsystému složeného ze dvou sériově N_{ser} a dvou paralelně N_{par} zapojených modulů (modifikováno z [28])

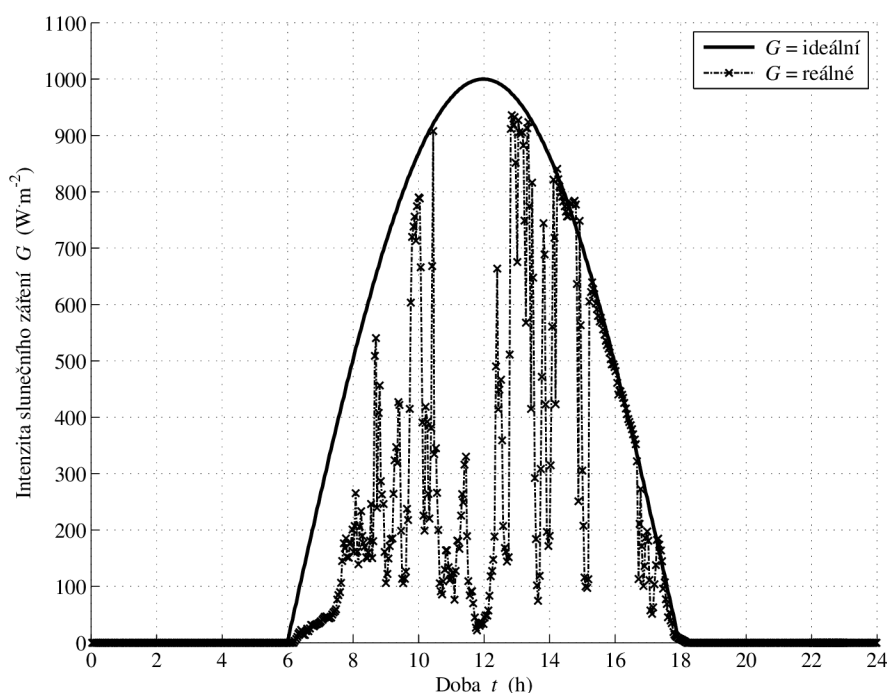
Fotovoltaické pole je dle Obr. 7.12 tvořeno dvěma moduly zapojenými do série a dvěma zapojenými paralelně. Následující Tab. 7.8 přináší doplňující parametry využitě při simulaci subsystému.

Cílem simulace je tedy aplikace modelu pro porovnání výkonových možností fotovoltaického subsystému během dne. Ideální rozložení intenzity slunečního záření během

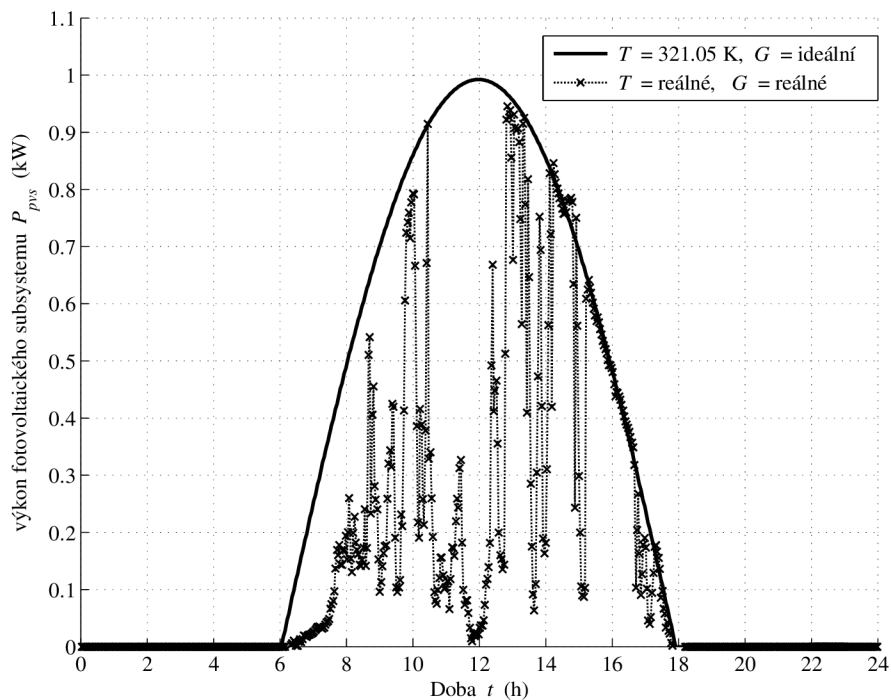
Tab. 7.8: Doplnující parametry použité pro simulaci fotovoltaického subsystému

Parametr	Označení	Velikost	Jednotka
Intenzita slunečního záření	G	reálná data	x
Teplota fotovoltaického modulu	T	reálná data	x
Nominální výkonu subsystému	P_{pvsn}	0,94	kW
Počet paralelně spojených modulů	N_{par}	2	-
Počet sériově spojených modulů	N_{ser}	2	-

dne, kdy je uvažována rovnodennost, je realizováno za využití rovnice (7.20) a její porovnání s reálným průběhem intenzit je na Obr. 7.13 [28].

**Obr. 7.13:** Porovnání ideální a reálné intenzity slunečního záření G v lokalitě Brno (modifikováno z [28])

Obr. 7.13 [28] zároveň představuje průběhy vstupních intenzit slunečního záření pro model subsystému. Průběhy výkonů zachycuje Obr. 7.14 [28]. Pro simulaci ideálního výkonu fotovoltaického subsystému se bere v úvahu konstantní teplota jednotlivých modulů $T = 321,05$ K. V blízké budoucnosti bude model rozšířen o subsystém sledování bodu maximálního výkonu (MPPT), který je představen v [114]. V aktuálním modelu je proto zaveden zjednodušující předpoklad, že je uvažováno konstantní napětí fotovoltaického subsystému V_{pvs} . Porovnání Obr. 7.13 [28] s Obr. 7.14 [28] opět demonstruje přímou závislost výkonu fotovoltaického subsystému P_{pvs} na intenzitě slunečního záření během dne. Konkrétně lze sledovat náhlé a rychlé změny výkonu subsystému. Maximální modelovaná změna výkonu vznikla během třiminutového intervalu, konkrétně



Obr. 7.14: Porovnání výkonů fotovoltaického subsystému složeného ze čtyř polykrystalických modulů ($N_{par}=2$ a $N_{ser}=2$) pro ideální a reálné atmosférické podmínky v lokalitě Brno (modifikováno z [28])

v době od 10 h 25 min do 10 h 27 min, kdy došlo k poklesu 60,96 % (vztaženo k nominálnímu výkonu subsystému P_{pvsn}). V případě, že fotovoltaický subsystém představuje jednu z částí hybridního systému, musí být na základě řídicího algoritmu pokles výkonu kompenzován ostatními kooperujícími subsystémy, aby byla zajištěna kontinuální a nepřerušovaná dodávka energie pro aktuálně připojenou zátěž. Tím je demonstrována hlavní přednost tvořených modelů subsystému, které mohou posloužit pro efektivní návrh hybridního systému, kdy lze vyhodnocovat odlišné provozní stavy, založené nejen na změně atmosférických podmínek.

8 Větrný zdroj energie a jeho simulace

Kapitola popisuje princip větrného zdroje energie a přináší základní údaje o této technologii. Věnuje se matematickému popisu nízkovýkonového větrného zdroje, přičemž konkretizuje potřebné vstupní parametry a jejich vzájemné vazby. Dále představuje výsledky dvou modelů větrných zdrojů energie, na kterých jsou demonstrovány možné přístupy matematického modelování. Výsledky jednoho z přístupů byly autorem prezentovány v [3]. Druhý přístup vznikl ve spolupráci autora a studenta při tvorbě diplomové práce [115].

8.1 Princip funkce větrného zdroje energie

Větrný zdroj energie představuje zařízení, které prostřednictvím větrné turbíny přeměňuje kinetickou energii větru na mechanickou energii, případně dále na elektrickou energii. Kinetika pevného tělesa je založena na skutečnosti, že hmotnost tělesa je konstantní. Vítr ovšem představuje pohybující se vzduch, proto je nutné na něj pohlížet jako na tekutinu, přičemž jeho hustota a rychlost se může měnit [116], což ovlivní i matematický popis přeměny kinetické energie větru na mechanickou energii. Detailní princip funkce větrného zdroje je uveden například v [117].

8.2 Druhy větrných zdrojů energie

Existují dva základní koncepty větrných turbín využívaných zejména pro výrobu elektrické energie. Jeden koncept představují turbíny s horizontální osou otáčení (HAWT), u kterých je osa rotace paralelní se směrem větru. Druhý koncept je zastoupen turbínami mající vertikální osu otáčení (VAWT), která je naopak kolmá na směr větru [118]. V publikaci [119] je deklarováno, že turbíny s horizontální osou otáčení jsou nákladově efektivnější než turbíny s vertikální osou. Díky své konstrukci mohou rotory dosahovat větších výšek a tím pádem využívat i příznivějších rychlostí větru. Výhodami konceptů turbín s vertikální osou otáčení jsou jejich nezávislost na směru větru a efektivní využití proměnného proudění [120].

Dále lze větrné turbíny dělit podle provozních stavů, během kterých rotor pracuje s konstantními nebo proměnnými otáčkami [119]. V režimu s konstantními otáčkami se rotor turbíny otáčí neměnnou úhlovou rychlostí bez ohledu na proměnlivost větru. Protože musí být rychlost rotoru za určitých podmínek omezována, turbína nepracuje efektivně, jelikož plně nevyužije energetický potenciál větrů všech rychlostí. Úhlová rychlost rotoru se volí většinou na základě frekvence sítě, ke které má být větrná elektrárna připojena. Platí, že turbíny s konstantními otáčkami vyrobí při nízkých rychlostech větru méně energie než turbíny s proměnnými otáčkami, u kterých je uvažována proporcionalní závislost [119]. Výhodou tohoto řešení je snížení finančních nákladů na výkonovou elektroniku, jako například na střídače a regulátory [120]. Větrné turbíny

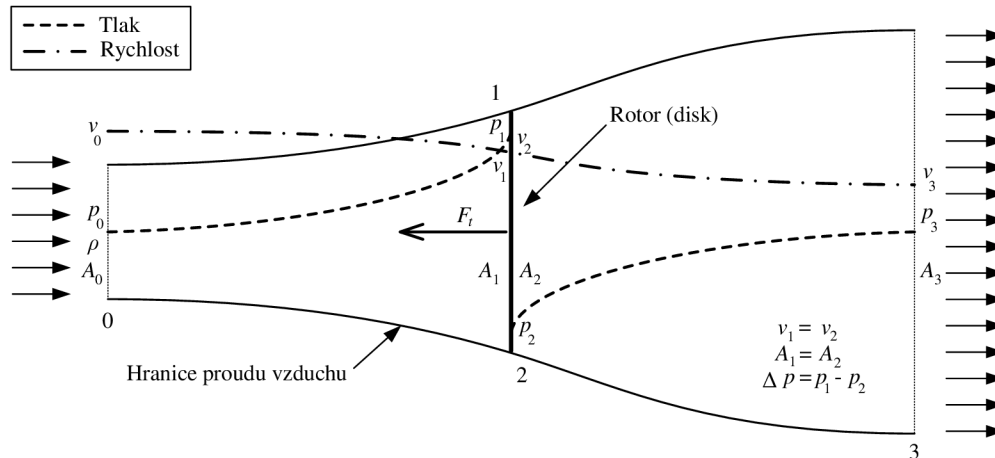
s konstantními otáčkami využívají jednu nebo dvě fixní rychlosti [121]. Literatura [121] uvádí, že větrná elektrárna s proměnnými otáčkami a generátorem s permanentními magnety bez převodovky vyrobí o 5 % až 10 % více energie než elektrárna s dvěma fixními rychlostmi a asynchronním generátorem s převodovkou, o 10 % až 15 % v případě uvažování jedné fixní rychlosti.

8.3 Popis vstupních parametrů a simulace

Základní model větrného zdroje energie lze rozčlenit na jednotlivé dílčí matematické popisy charakterizující například větrnou turbínu, hřídel s převodovkou, generátor, regulátory a jiné. Použití dílčí popisů se však odvíjí od koncepce větrného zdroje a jeho reálného provedení. Pro všechny modely větrného zdroje energie avšak platí, že je nezbytné vyjádřit přeměnu kinetické energie větru na mechanickou energii.

8.3.1 Aerodynamický model a popis generátoru

Přehled metod využitelných pro tvorbu aerodynamického modelu je včetně detailního popisu uveden v [117]. Aerodynamický model větrné turbíny je v této práci vyjádřen pomocí metody, která využívá homogenního disku a kontrolního objemu. Schématické znázornění je na Obr. 8.1 a metoda je popsána v [117, 120]. Metoda využívá homo-



Obr. 8.1: Schématické znázornění použitého aerodynamického modelu

genního disku (tzv. metoda actuator disk), coby rotoru větrné turbíny s nekonečným počtem lopatek schopných extrahovat energii z větru (proudícího vzduchu). Jedná se o základní aerodynamické vyjádření uvažující nekonečně tenký disk s plochou A_R , jehož pohyb není omezován třecími silami. Na Obr. 8.1 jsou vyznačeny i hraniční proudnice vzduchu, které ještě projdou rotorem (diskem). Proudící vzduch prochází čtyřmi oblastmi označenými 0 až 4, a tomu odpovídajícími průřezovými plochami A_0 až A_4 . Průřezová plocha představuje vždy plochu řezu kontrolním objemem v konkrétní oblasti. Hraniční proudnice pak definují oblast kontrolního objemu. Dá se předpokládat,

že hmotnostní tok opouštějící tento objem je teoreticky nulový. Naznačeny jsou i průběhy rychlosti a tlaku v uvažovaných oblastech. Podle [120] je vzduch považován za nestlačitelný a jeho proudění je homogenní, ustálené a pouze přímočaré. Rovněž se předpokládá, že rychlost vzduchu, který proudí přes rotor v_R , je v celé jeho ploše stejná. Zavedené předpoklady vedou ke skutečnosti, že platí $v_R = v_1 = v_2$ a $A_R = A_1 = A_2$. Za uvedených předpokladů lze podle [116] stanovit hmotnostní průtok vzduchu rotorem pomocí vztahu

$$Q_m = A_R \cdot \rho \cdot v_R, \quad (8.1)$$

kde Q_m je hmotnostní průtok vzduchu rotorem větrné turbíny ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), A_R je plocha opisovaná rotorem turbíny (m^2), ρ je hustota vzduchu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a v_R je rychlost vzduchu procházejícího rotorem ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Pro stanovení hustoty vzduchu je možné využít stavové rovnice (6.23) pro ideální plyn, z níž vyplývá, že s rostoucím tlakem a klesající teplotou hustota vzduchu poroste [118]. Dále je nutné respektovat klesající tendenci hodnot tlaku a teploty s rostoucí nadmořskou výškou. Změna hustoty vzduchu pro libovolnou nadmořskou výšku se podle [116] vyjádří následovně

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-\frac{0.297}{3.048}h}, \quad (8.2)$$

kde ρ_0 je hustota vzduchu v nulové nadmořské výšce ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a h je skutečná nadmořská výška (m). Obr. 8.1 ukazuje, že se v dostatečné vzdálenosti před rotorem pohybuje vzduch rovnoměrnou rychlostí v_0 a tlakem p_0 . Z průběhu rychlostí je zřejmé, že rychlost v_0 je mezi proudnicemi zpomalována na rychlost v_1 a klesá až na rychlost v_3 . Aplikací zákona zachování hybnosti na uvažovaný kontrolní objem platí, že síla působící na rotor větrné turbíny F_t je reakcí na sílu, jež vznikla změnou hybností. Přírůstek hybnosti hmoty vzduchu směřující za rotor odpovídá tahové síle rotoru, podle [120] platí

$$F_t = -Q_m (v_0 - v_3), \quad (8.3)$$

kde F_t je tahová síla působící na rotor větrné turbíny (N), v_0 je rychlost vzduchu v oblasti 0 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a v_3 je rychlost vzduchu v oblasti 3 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Z Obr. 8.1 vyplývá, že proud vzduchu je rozdělen na dvě části, na které lze aplikovat Bernoulliho rovnici. Pro část před rotorem platí dle [120] vyjádření

$$p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2 = p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_R^2, \quad (8.4)$$

kde p_1 je tlak vzduchu v oblasti 1 před rotorem (Pa). Pro část za rotorem platí rovnice

$$p_3 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_3^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_R^2, \quad (8.5)$$

kde p_2 tlak vzduchu v oblasti 2 (Pa). V dostatečné vzdálenosti před rotorem (tj. oblast 0) a za rotorem (tj. oblast 3) větrné turbíny se předpokládá rovnost velikostí

jednotlivých tlaků $p_0 = p_3$. Tlakové ztráty na rotoru ΔP vystihuje rovnice (8.4) a (8.5) nebo jako rozdíl tlaků před a za rotorem

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_0^2 - v_3^2) = p_1 - p_2, \quad (8.6)$$

kde Δp je tlaková ztráta na rotoru větrné turbíny. Vztah (8.6) může také posloužit pro vyjádření síly, která působí na rotor, a to v následující podobě

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot A_R \cdot \rho \cdot (v_0^2 - v_3^2). \quad (8.7)$$

Dosazením rovnice (8.1) do rovnice (8.3) a následným porovnáním s rovnicí (8.7) se určí rychlost větru procházející rotorem turbíny

$$v_R = \frac{v_0 + v_3}{2}. \quad (8.8)$$

Rovnice (8.8) dokazuje, že tato rychlost odpovídá aritmetickému průměru rychlostí vzduchu v dostatečné vzdálenosti před a za rotorem [120]. Podle zákona zachování energie se vyjádří výkon větrné turbíny jako [116]

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_R \cdot A_R (v_0^2 - v_3^2), \quad (8.9)$$

kde P_R je výkon větrné turbíny (W). Další vyjádření výkonu větrné turbíny je v [120] provedeno na základě definice axiální faktoru a . Tento faktor lze definovat jako

$$a = \frac{v_0 - v_R}{v_0}, \quad (8.10)$$

kde a je axiální faktor (-). Axiální faktor vyjadřuje závislost rychlosti vzduchu procházejícího rotorem na počáteční rychlosti, tj. rychlosti vzduchu v oblasti 0. Úpravou rovnice (8.10) je možné stanovit přímo rychlost vzduchu procházejícího rotorem jako

$$v_R = v_0 (1 - a). \quad (8.11)$$

Porovnáním rovnice (8.8) s předešlou rovnicí (8.11) lze za pomoci axiálního faktoru určit i rychlost vzduchu pro oblast 3

$$v_3 = v_0 (1 - 2 \cdot a). \quad (8.12)$$

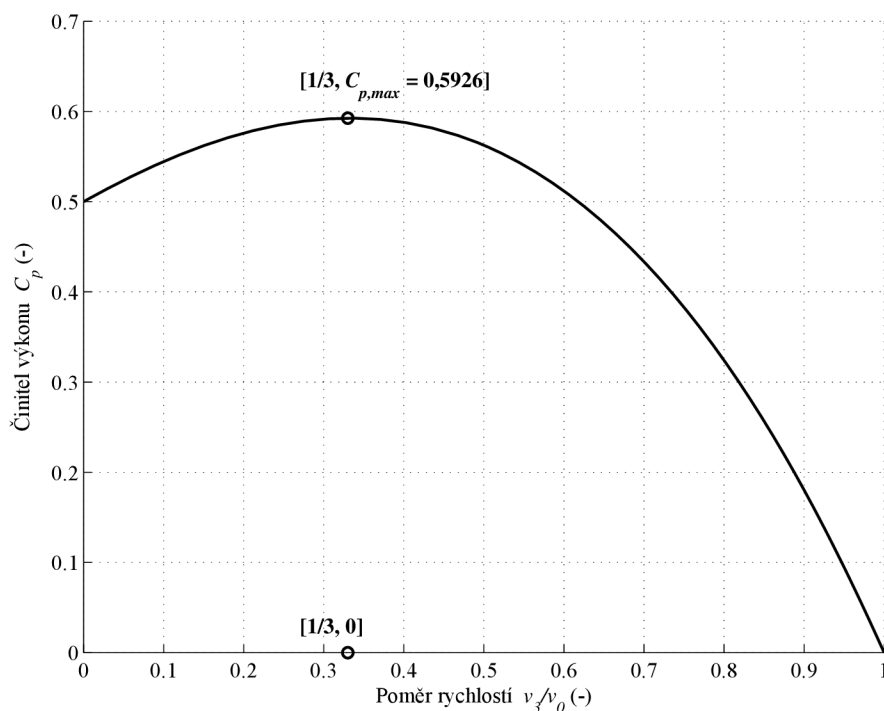
Vyjádřené předpoklady platí a aplikují se podle [117] pouze na případy, kdy axiální faktor je menší než 0,4. Při vyšších hodnotách již dochází v oblasti za turbínou k tvorbě vzdušných vírů, které mají za následek porušení uvažované hranice kontrolního objemu přenosem hmotnostního toku. Je-li zaveden axiální faktor, pro výkon turbíny platí následující rovnice

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot v_0^3 \cdot C_P = 2 \cdot \rho \cdot A_R \cdot v_0^3 \cdot a (1 - a)^2, \quad (8.13)$$

kde C_p je výkonový součinitel (-), který je jedním z nejdůležitějších parametrů charakterizující větrný zdroj energie. Tento součinitel vyjadřuje jak velký výkon se získá rotorem z větru, což odpovídá poměru reálného výkonu větrné turbíny k výkonu, který lze teoreticky využít. Je zřejmé, že hodnota výkonového součinitele významně ovlivňuje výslednou hodnotu výkonu větrné turbíny. Literatura [116] využívá vyjádření výkonového součinitele pouze rychlostmi a [120] využívá pouze axiálního faktoru, proto platí následující

$$C_P = \frac{P_R}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot v_0^3} = \frac{1 - \left(\frac{v_3}{v_0}\right)^2 + \left(\frac{v_3}{v_0}\right) - \left(\frac{v_3}{v_0}\right)^3}{2} = 4 \cdot a (1 - a)^2 \quad (8.14)$$

Maximální hodnotu výkonového součinitele lze určit pomocí derivace rovnice (8.14), respektive pomocí vyšetření maxima funkce. Následující Obr. 8.2 ukazuje průběh výkonového součinitele v závislosti na poměru rychlostí v dostatečné vzdálenosti před a za lopatkami rotoru větrné turbíny



Obr. 8.2: Závislost výkonového součinitele C_P na poměru rychlostí před a za lopatkami rotoru větrné turbíny (modifikováno z [3])

Výsledkem je hodnota maximálního výkonového součinitele $C_{P,max}$, který je 0,5926. Hodnoty se dosahuje tehdy, pokud hodnota axiálního faktoru je $\frac{1}{3}$. Jelikož je výkonový součinitel definován jako poměr dosaženého a teoretického výkonu větrné turbíny, představuje hodnota 0,5926 maximální hodnotu poměrného výkonu, který je možné získat z větru. Tato skutečnost je označována jako takzvaný Betzův limit. U reálných provozů se hodnoty pohybují v rozmezí od 0,35 do 0,45 [120]. Z předchozí rovnice (8.14)

je zřejmé, že výkonový součinitel není konstantní. Dále se uvažuje, že poměr rychlostí $\frac{v_3}{v_0}$ představuje takzvaný koeficient rychloběžnosti λ , pro který dle [116, 122–124] platí

$$\lambda = \frac{v_3}{v_0} = \frac{\omega \cdot R}{v}, \quad (8.15)$$

kde λ je koeficient rychloběžnosti (-), ω je úhlová rychlost rotoru větrné turbíny ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$), R je poloměr rotoru (m) a v je rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). V případě, že větrná elektrárna využívá rotoru s možností natáčení lopatek, není součinitel výkonu závislý pouze na koeficientu rychloběžnosti, ale také na úhlu natočení lopatek β [3, 122]

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot v^3 \cdot C_P(\beta, \lambda), \quad (8.16)$$

kde β je úhel natočení lopatky větrné turbíny ($^\circ$). V [122] je představeno empirické nelineární vyjádření součinitele výkonu v závislosti na změně koeficientu rychloběžnosti, a které má tuto podobu

$$C_P(\beta, \lambda) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}}, \quad (8.17)$$

kde λ_i je pomocná veličina (-) a je rovna následujícímu vztahu

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}, \quad (8.18)$$

Podle [125] se grafický průběh výkonového součinitele používá jako referenční křivka při regulaci činného výkonu větrného zdroje. Literatura uvádí, že při použití rovnic (8.17) a (8.18) dosahuje maximální výkonový součinitel hodnoty 0,438, což odpovídá $\beta = 0,0$ a $\lambda = 6,3$. Jednotlivé typy větrných turbín dosahují odlišných maximálních výkonových součinitelů. Konkrétní hodnoty a grafické průběhy součinitele výkonu pro jednotlivé typy větrných turbín jsou prezentovány například v [121].

Výše uvedené vztahy představily základní závislosti přeměny energie větru na mechanickou energii rotoru větrné turbíny. Avšak pro transformaci mechanické energie na elektrickou energii je důležité respektovat vlastnosti použitého generátoru. Odborný článek [126] zachycuje rovnice, které vyjadřují vzájemné propojení mechanického výkonu turbíny a elektrického výkonu generátoru. Pro mechanický výkon platí, že

$$P_R = T_m \cdot \omega, \quad (8.19)$$

kde T_m je točivý mechanický moment ($\text{N}\cdot\text{m}$). Elektrický výkon generátoru lze popsat jako

$$P_s = T_{em} \cdot \omega_s, \quad (8.20)$$

kde P_s je výstupní elektrický výkon statoru (W), T_{em} elektromagnetický točivý moment ($\text{N}\cdot\text{m}$) a ω_s je úhlová rychlost magnetického toku generátoru ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$). Pro ideální generátor platí následující rovnice [126]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_{em}), \quad (8.21)$$

kde J je moment setrvačnosti ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$). Vzhledem k tomu, že existují principiálně různá provedení generátorů, je nezbytné respektovat specifika konkrétního řešení a zohlednit je v matematickém modelu generátoru. Základní model asynchronního generátoru uvádí [122]. Podrobné představení modelu třífázového asynchronního generátoru a jednotlivých závislostí je v [127]. Další model asynchronního generátoru popisuje [128], kde jsou rovněž představeny modely hnacího ústrojí a převodovky, které uvažují i součinitele tlumení a tuhostí. Matematický popis synchronního generátoru s permanentními magnety je pak prezentován například v [124]. Úpravou předchozí rovnice (8.19) lze vyjádřit točivý mechanický moment pomocí součinitele výkonu a momentu jako

$$T_m = \frac{P_R}{\omega} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot A_R \cdot R \cdot v^2 \cdot C_P}{\lambda} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot R \cdot v^2 \cdot C_T, \quad (8.22)$$

kde C_T je součinitel momentu (-). V [121] je uvedena závislost mezi součinitelem výkonu a součinitelem momentu. Vyjádří se následovně

$$C_P = C_T \cdot \lambda. \quad (8.23)$$

Stejným způsobem jako výkonový součinitel se stanoví i součinitel momentu. Platí, že

$$C_T = \frac{F_t}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot v_0^2} = C_T = 4 \cdot a(1 - a) \quad (8.24)$$

Tahovou sílu větrné turbíny lze zaznamenat pomocí axiálního faktoru jako

$$F_t = 2 \cdot \rho \cdot A_R \cdot v_0^2 \cdot a(1 - a) \quad (8.25)$$

Obdobně platí, že tak jako byla stanovena maximální hodnota výkonového součinitele, je možné stanovit maximální hodnotu součinitele momentu $C_{T,max}$. Vyšetřením funkce součinitele momentu (8.24) může koeficient dosáhnout maximálně hodnoty 1,0 při $a = \frac{1}{2}$. Pokud větrná turbína pracuje s maximálním výkonovým součinitelem, pak součinitel momentu odpovídá hodnotě $\frac{8}{9}$ [120]. Konkrétní hodnoty a grafické průběhy součinitele momentu pro jednotlivé typy větrných turbín jsou v [121].

8.3.2 Stanovení rychlosti větru

Stejně jako fotovoltaické zdroje energie, i větrný zdroj je silně závislý na atmosférických podmínkách, zejména na směru a rychlosti větru. Pro matematické modely větrných zdrojů a větrných elektráren se obecně využívá i matematických modelů, které představují pravděpodobný vývoj větru za určité období v konkrétní lokalitě. Podle [129] vychází řada studií řešících problematiku větrných zdrojů z průměrných hodnot rychlostí větru. Studie větrné elektrárny má vycházet ze statistiky rychlosti větrů, která respektuje standardní odchylku, ale kvůli asymetrickému rozdělení rychlostí, i koeficienty šikmosti. Dále je zde uvedeno, že stanovení větrných charakteristiky je možné věrohodně realizovat prostřednictvím funkcí popisujících rozdělení pravděpodobnosti,

například pomocí Weibullova nebo Gamma rozdělení. Podrobněji je chování a modelování větru popsáno v [118].

V knize [118] je také řešena problematika stanovení průměrné rychlosti větru v konkrétní lokalitě. Existují mezinárodní standardy, které deklarují měřicí výšku pro měření rychlosti a směru větru. Kniha [118] uvádí, že na hydrometeorologických stanicích se měření rychlosti větru provádí ve výšce 10 metrů nad zemským povrchem, což lze považovat za referenční hodnotu.

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_{ref}} = \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha, \quad (8.26)$$

kde \bar{v} je průměrná rychlost větru ve výšce h ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), \bar{v}_{ref} je průměrná rychlost větru ve výšce h_{ref} ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), h je výška nad zemským povrchem, ve které je uvažována rychlost \bar{v} (m), h_{ref} je výška nad zemským povrchem, ve které je uvažována rychlost \bar{v}_{ref} (m) a α je koeficient drsnosti povrchu (-). V [118] je dále zmíněna skutečnost, že moderní větrné turbíny mohou dosahovat výšky několik desítek metrů a že se v takovém případě využije koeficientu drsnosti $\alpha = \frac{1}{7}$ a průměrná rychlost větru je extrapolována podle rovnice (8.26). Následující Tab. 8.1 [4] ukazuje hodnoty drsnosti povrchů pro jednotlivé typy terénů.

Tab. 8.1: Hodnoty drsností povrchů pro jednotlivé typy terénů (modifikováno z [4])

Označení povrchu	Typ terénu	Drsnost povrchu $\alpha(-)$
a	hladký povrch (vodní hladina, písek)	0,14
b	louka s nízkým travnatým porostem, oranice	0,16
c	vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
d	porosty vysokých kulturních plodin	0,21
e	lesy	0,28
f	vesnice a malá města	0,48

Jelikož měření průměrných referenčních rychlostí probíhá ve výšce 10 m nad zemským povrchem, jsou hodnoty korekčních součinitelů pro stanovení průměrné rychlosti v konkrétní výšce a terénu uvedeny v [4]. Pomocí těchto součinitelů lze snadněji zjistit odchylku skutečné rychlosti od rychlosti referenční. Detailní charakteristika a specifika jednotlivých terénů jsou popsány v [118].

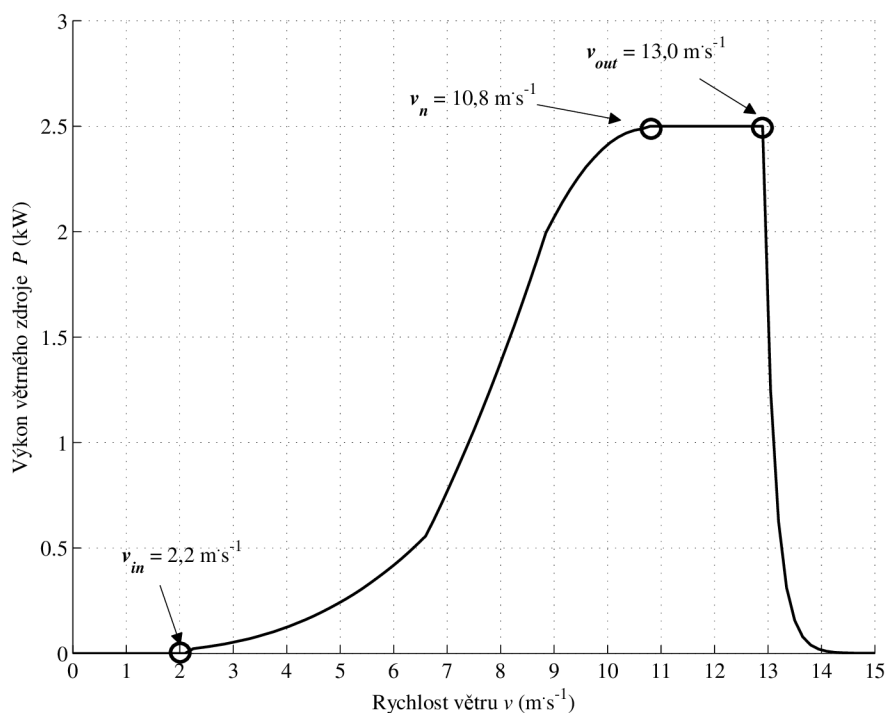
8.3.3 Model větrného zdroje - I. přístup

Publikace [121, 123] přesně specifikují výkonové oblasti, při kterých větrná elektrárna dosahuje různých provozních stavů. Hranice jednotlivých oblastí jsou definovány rychlostmi větru, při kterých je elektrárna spuštěna, pracuje s nominálním výkonem nebo je vyřazena a zastavena. Podle [4] je minimální rychlost větru, při které je elektrárna

spuštěna a vyrábí elektrickou energii, nejčastěji v rozmezí od $3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dále se uvádí, že při rychlostech nad $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dochází k odstavení elektrárny. Uvedená rozmezí je ovšem nutné brát jako informativní a zcela individuální pro každou větrnou elektrárnu, neboť tyto se vzájemně liší svým technickým provedením.

Jeden z možných způsobů zjednodušeného modelování větrného zdroje energie představuje [30]. Jedná se pouze o výkonový popis konkrétní větrného zdroje. Z modelu je možné získat pouze elektrický výkon, který je větrnou elektrárnou vyroben. Výkonová křivka umožňuje pro konkrétní rychlost větru přiřadit odpovídající výkon. Zmíněný model umožňuje analyzovat pouze jeho výkonové možnosti, bez znalosti další elektrických a neelektrických veličin. Při využití tohoto přístupu je však důležité správně modelovat výkonovou křivku větrného zdroje, aby plně vystihla jednotlivé provozní stavy.

V prostředí MATLAB[®] je vytvořen základní popis větrného subsystému představující malou větrnou elektrárnu, která využívá turbínu s horizontální osou otáčení. Jmenovitý elektrický výkon elektrárny je $2,5 \text{ kW}$ a elektrárna pracuje s generátorem s neodym permanentními magnety (NdFeB). Rotor turbíny má lopatky s průměrem $3,6 \text{ m}$. Průběh výkonu větrné elektrárny je na následujícím Obr. 8.3.



Obr. 8.3: Výkonová křivka větrného zdroje energie (modifikováno z [3])

Vytvořený teoretický model tedy využívá přístupu popsaného v [30]. Z Obr. 8.3 lze vidět, že výkonová křivka turbíny je nelineární a že větrný zdroj energie začíná vyrábět elektrický výkon až při rychlostech nad $2,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Optimální provoz (s jmenovitým výkonem) nastává při rychlosti $10,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro rozmezí od $10,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $13,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ má větrný zdroj potenciál vyrábět vyšší výkon. Díky regulaci natočení rotoru se však jeho výkon udržuje na jmenovité hodnotě. Pokud je dosaženo rychlostí nad $13,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, které

jsou již nad rámec možností regulace, dochází z důvodu nebezpečně vysokých otáček k odstavení elektrárny. Toto odstavení představuje v charakteristice poměrně strmý propad výkonu. Nutností je rovněž respektovat dynamiku větrné turbíny, a to v důsledku setrvačnosti rotoru a kroky, které byly provedeny regulačními prvky. Podle [30] lze odezvu větrné turbíny reflektovat mírně tlumeným systémem druhého řádu popsaného následující funkcí

$$y(s) = \left(\frac{0,25}{s^2 + 0,70 \cdot s + 0,25} \right) x(s), \quad (8.27)$$

kde $y(s)$ představuje aktuální výstupní výkon větrné turbíny (W) a $x(s)$ je výkon získaný z výkonové křivky pro jednotlivé rychlosti větru (W). Regulace malých větrných elektráren využívá regulačního kormidla, které natáčí rotor do směru větru, čímž zajistí maximální účinnost transformace větrné energie [4]. Podle [4] je výkon větrných elektráren regulován pomocí regulací stall, pitch, active stall a nebo kombinací stall-pitch a pitch-stall. Podle [4] jsou větrné elektrárny s regulací stall konstrukčně jednodušší než s regulací pitch. Překračuje-li výkon větrné elektrárny bezpečné meze, dojde u pitch regulace k natočení lopatek rotoru. Natočení způsobí snížení vztlaku na lopatku, čím dojde také ke snížení momentu na hřídeli. Při potřebě vyššího momentu na hřídeli při nízkých rychlostech větru pracuje regulace opačným směrem. Během normálního provozního stavu větrné elektrárny s proměnnými otáčkami s pitch regulací se podle [123] předpokládá, že dojde k natočením lopatek s rychlostí přibližně od $5 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$ do $10 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$. Představení strategií řízení pomocí pitch regulací je například v [122, 123].

8.3.4 Model větrného zdroje - II. přístup

Další uvedený matematický model vznikl ve spolupráci se studentem magisterského studia, a to při vedení jeho diplomové práce [115]. Autor této disertační práce se aktivně podílel na tvorbě modelu a organizoval reálná měření nezbytná pro verifikaci modelu. Model představuje zjednodušený matematický model malé větrné elektrárny se Savoniovým-Darrieovým rotorem vytvořeným v prostředí MATLAB[®]/Simulink. Matematický model popisuje větrnou elektrárnu s výkonem 300 W s typovým označením DC-300, který využívá pomaluběžný synchronní generátor s permanentními NdFeB magnety. Následující Tab. 8.2 ukazuje některé parametry větrné turbíny.

Tab. 8.2: Hodnoty parametrů větrné turbíny [131]

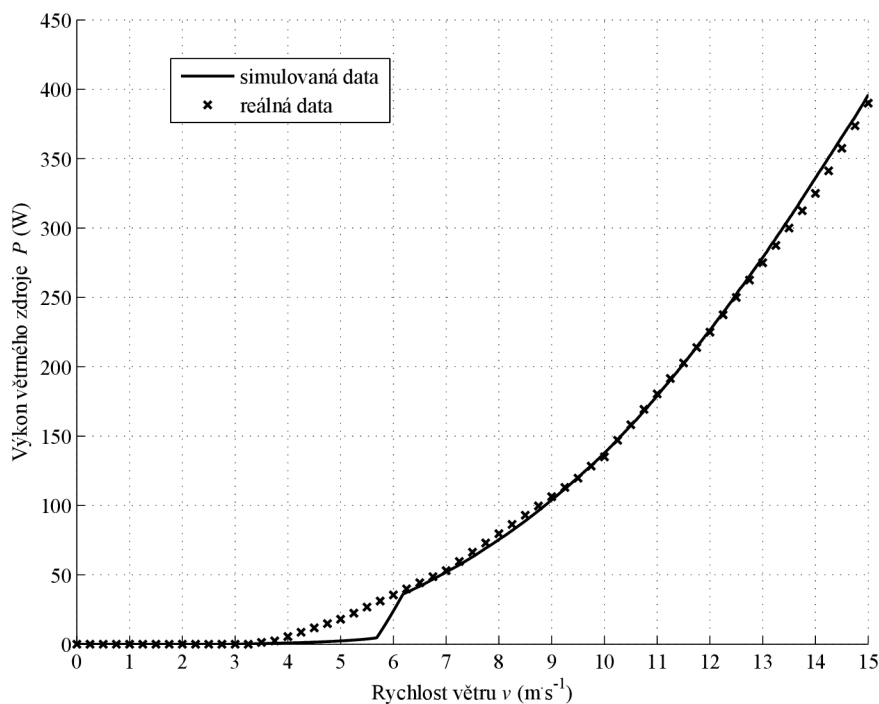
Parametr	Označení	Velikost	Jednotka
Poloměr rotoru	R	0,62	m
Spouštěcí rychlost větru	v_{in}	3,0	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Rychlost větru pro odstavení	v_{out}	15,5	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Rychlost při jmenovitém výkonu	v_n	13,5	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Výsledky simulací mají zejména demonstrovat jiný možný přístup, kdy lze pro simulaci využít již definovaných bloků z MATLAB®/Simulink charakterizující například synchronní generátor. Vzhledem k tomu, že tvorba podrobného modelu větrného zdroje je předmětem zejména dalšího vědeckého bádání, mají prezentované výsledky spíše doplňující charakter. Pro simulaci generátoru je využito bloku *Permanent magnet synchronous machine* z knihovny *SimPowerSystem* programu MATLAB®/Simulink. Následující Tab. 8.2 ukazuje parametry použité při simulaci větrné elektrárny.

Tab. 8.3: Parametry generátoru a další doplňující parametry použité pro simulaci [115]

Parametr	Označení	Velikost	Jednotka
Odpor vinutí generátoru	R_a	0,3528	Ω
Podélní indukčnost generátoru	L_d	0,0637	mH
Příčná indukčnost generátoru	L_q	0,0517	mH
Magnetický tok	Φ	0,03	Wb
Moment setrvačnosti generátoru	J	$5,2 \cdot 10^{-4}$	kg·m ²
Součinitel tlumení	B	$3,035 \cdot 10^{-5}$	N·m·s·rad ⁻¹
Počet pólových dvojic	p	8	-
Výstupní napětí měniče	V_d	24	V

Hodnoty podélné a příčné indukčnosti generátoru jsou stanoveny podle [130]. Úplná technická specifikace větrné turbíny a použitého generátoru jsou v [131]. Porovnání reálné a simulované výkonové charakteristiky větrné elektrárny je na Obr. 8.4.



Obr. 8.4: Porovnání výkonových charakteristik reálné a simulované VTE [115]

Při simulaci je součinitel výkonu hybridní větrné elektrárny stanoven podle metody a empirického vyjádření uvedených v [132]. Celkový přehled všech empirických koeficientů použitých při simulaci je uveden v [115]. U simulované hybridní větrné elektrárny se nebere v úvahu změna úhlu natočení lopatek, proto ji neuvažuje ani součinitel výkonu. Z porovnání na Obr. (8.4) je patrná chybovost matematického modelu v nižších otáčkách. V oblasti nad $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se dosahuje relativní chyby kolem 3 %. Veškeré výsledky a podrobnější popis jsou uveřejněny v [115]. Kromě detailnějšího popisu matematického modelu větrné elektrárny je v [115] také naznačena modifikace matematického generátoru větru, který využívá bílého šumu a který je určený pro vztlakové elektrárny s horizontální osou otáčení. Jednotlivé modely generátorů větrů mohou respektovat skutečnost, pro který druh větrné turbíny jsou určeny. Díky tomu mohou reálněji popsat chování větru v oblasti rotoru turbíny, protože například respektují momentové nárazy kolem stožáru při průchodu větru rotorem. Vzhledem k tomu, že se jedná o výsledky získané ze základního modelu větrné elektrárny, bude model dále zdokonalován a výsledky průběžně publikovány.

9 Závěr

V závěru práce je deklarováno splnění stanovených cílů. Následně je proveden souhrn nových poznatků a je představen vlastní přínos. Práce dále ukazuje na praktické využití jednotlivých výstupů a předkládá návrh následných vědeckých prací.

9.1 Splnění jednotlivých cílů práce

Disertační práce demonstrovala existenci mnoha konceptů hybridních systémů. Představené koncepty ukázaly, že se jedná o spolupráci různých a hlavně principiálně odlišných zdrojů energie. Z rozmanitého portfolia hybridních systémů byl vybrán takový koncept, který by byl perspektivní do budoucna. Zvolený koncept hybridního systému byl následně formou parciálního řešení podroben matematickým simulacím. Za perspektivní lze považovat kooperaci vodíkového palivového článku typu PEMFC a obnovitelných zdrojů energie. Na vodíkové technologie a obnovitelné zdroje energie je obecně pohlíženo s velkou nadějí do budoucna, čemuž do jisté míry přispívají i současné ekologické požadavky. Práce ovšem nikterak nezastírá, že palivové články, obnovitelné zdroje energie nebo hybridní systémy nebudou v blízké budoucnosti schopny svým výkonem konkurovat konvenční výrobě elektřiny. Vzhledem k technickým a ekonomickým aspektům budou palivové články nacházet uplatnění právě v hybridních systémech nebo v kogeneračních jednotkách na úrovni rezidencí. Práce proto zmínila projekty, které podporují využití PEMFC v kogeneračních jednotkách a navíc využívají zařízení produkující vodík přímo ze zemního plynu. Na druhou stranu, koncepty hybridních systémů s palivovými články jsou výhradně postaveny na přítomnosti elektrolyzérů, díky nimž je získáván vodík využitelný pro článek. V praxi je však vodík nejčastěji produkován chemickými procesy z fosilních paliv, proto je i oprávněné uvažovat právě zemní plyn pro produkci vodíku. Pro větší transparentnost toho rozhodnutí byly představeny základní technologie výroby vodíku.

Různé principy výroby energie jednotlivých zdrojů, eventuálně variabilita vstupních veličin, poukázaly na oprávněnost tvorby matematických modelů. Jelikož předmětem práce bylo parciální řešení hybridního systému, byl individuálně řešen i vývoj matematických modelů nízkoteplotního palivového článku, fotovoltaického a větrného zdroje. Za stěžejní byl považován zejména vývoj modelu palivového článku a modelu fotovoltaického modulu. Vývoj modelů byl veden způsobem, který by garantoval zajištění jejich praktické aplikovatelnosti. Z toho důvodu vývoj modelu palivového článku nezahrnoval pouze jeho zdokonalený popis a analýzu, ale byl také vhodně doplněn o model reforméru nebo o regulátory a DC/DC konvertor. Model reforméru respektoval skutečnost, že pro výrobu vodíku je potřeba zemní plyn. Model článku společně s rozšiřujícími modely byl podroben řadě experimentů, které vyšetřily ustálené provozní stavy, ale hlavně analyzovaly dynamické chování elektrických a neelektrických veličin. Práce se nezabývala pouze simulací vodíkových technologií, ale parciálně řešila jednotlivé části zvoleného konceptu hybridního systému.

Pokud by hybridní systém obsahoval obnovitelné zdroje energie, bylo by dobré znát i vývoj atmosférických podmínek v místě instalace těchto zdrojů a stanovit jejich výkonovou dostupnost. Byl proto realizován a verifikován model fotovoltaického modulu založený na parametrizaci přímo ze štítkových hodnot. Součástí realizace byla také implementace zdokonaleného výpočtu jednotlivých odporů modulu. Práce rovněž ukázala, že pro návrh fotovoltaických zdrojů je možné využít i veřejně dostupných databází, které by pro konkrétní zvolenou lokalitu nabídly informace o průbězích dopadajícího slunečního záření nebo teploty. Vytvořený model fotovoltaického modulu využíval data atmosférických podmínek, která byla získána z realizovaného dlouhodobého měření. Změřená data dále posloužila pro zhodnocení relevance veřejných databází, a to na základě konfrontace ekvivalentních veličin. Data také posloužila pro vytvoření aplikace, která posuzovala a hodnotila výkonovou dostupnost fotovoltaického zdroje. Pro doplnění parciálního řešení hybridního systému byl popsán a simulován zjednodušený model větrné elektrárny, jehož zdokonalení lze provést v budoucí práci. Především text každopádně naznačuje vyřešení stanovených cílů práce z kapitoly 5. Naplnění konkrétních cílů je deklarováno následujícím popisem.

9.1.1 Specifikace nedostatků současných systémů a modelů

V práci byly identifikovány hlavní zákonitosti, závislosti a vazby, které vedly ke správnému modelování PEMFC a hybridního systému jako celku. Charakteristika palivových článků byla autorem představena v knize [4]. Na základě přehledu provozovaných nebo modelovaných konceptů hybridních systémů v energetice byla provedena specifikace hlavních nedostatků modelů PEMFC. Specifikace vedla k vytvoření nového zdokonaleného dynamického modelu palivového článku. Uvedená problematika byla autorem publikována v [3].

9.1.2 Návrh a tvorba nového modelu PEMFC

Nedostatkem současných modelů bylo zavádění zjednodušujících předpokladů, přičemž některé dynamicky se vyvíjející veličiny byly považovány za konstantní a některé závislosti nebyly uvažovány vůbec. V programu MATLAB[®] a v MATLAB[®]/Simulink byl vytvořen nový matematický model palivového článku. Vytvořený model eliminoval hlavní nedostatky současných verifikovaných modelů a umožnil vyšetřování jednak ustálených stavů PEMFC, ale hlavně dynamického chování jeho elektrických a neelektrických veličin, a to v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Tvorba nového modelu palivového článku byla autorem postupně představena v několika na sebe navazujících publikacích. Prvotní návrh byl publikován v [35]. Model byl dále doplněn o modely reforméru a DC/DC konvertoru. V návaznosti na to byla v [58] představena implementace modelu reforméru. Popis modelu DC/DC konvertoru byl autorem popsán v [59].

9.1.3 Analýza provozních stavů PEMFC

Na vytvořeném modelu PEMFC proběhla analýza různých ustálených provozních stavů článku. Byly realizovány experimenty, které vedly k vyšetření dynamických změn napětí, výkonu a teploty článku pro dlouhodobý simulační scénář a které autor prezentoval v [35]. Model PEMFC rozšířený o model reforméru byl podroben tepelným experimentům ukazující vliv změny tepelné kapacity a tepelného odporu článku na jeho provozní teplotu a výstupní výkon. Výsledky tepelných experimentů byly představeny v [58]. Další provedené experimenty analyzovaly elektrické poměry na DC/DC konvertoru a byly autorem uvedeny v [59].

9.1.4 Návrh komplexního modelu fotovoltaického modulu

V práci byl proveden matematický popis fotovoltaického modulu využívající pro parametrizaci výhradně štitkové hodnoty. Provedený popis umožňoval implementaci iteračního výpočtu odporů a respektoval jejich teplotní závislost. Na základě tohoto popisu byl v programu MATLAB[®] vytvořen samotný fotovoltaický model. Návrh komplexního modelu fotovoltaického modulu byl autorem objasněn v [3, 28].

9.1.5 Analýza navrženého fotovoltaického modulu

Vytvořený model fotovoltaického modulu byl podroben analýze, která potvrdila jeho verifikaci. Byla provedena simulace fotovoltaického subsystému, ve kterém byly jako vstupní veličiny použity štitkové hodnoty jednotlivých fotovoltaických modulů, ale také dlouhodobě měřená hydrometeorologická data. Výsledky potvrzující verifikaci modelu a ukazující simulace fotovoltaického subsystému autor prezentoval v [28].

9.1.6 Analýza výkonové disponibility fotovoltaického zdroje a ověření vhodnosti veřejné databáze

Pro ověření disponibility fotovoltaického zdroje byla vytvořena aplikace v programu MATLAB[®], která umožnila zpracovat a vyhodnotit data získaná z kontinuálního dlouhodobého měření referenčního fotovoltaického modulu. Dosažené výsledky byly autorem představeny v [2]. Aplikace umožnila porovnat hodnoty slunečního záření dopadajícího na referenční modul s hodnotami množství sluneční energie obsaženými ve veřejné databázi. Na základě porovnání byla ověřena vhodnost využití těchto databází pro návrh fotovoltaických zdrojů. Závěry z provedené konfrontace byly autorem publikovány v [87].

9.1.7 Model větrného zdroje energie

V rámci práce byl popsán a simulován zjednodušený model větrného zdroje energie a byly nastíněny možnosti dalšího zdokonalení a rozšíření modelu. Model větrného zdroje byl autorem představen v [3].

Na základě výše uvedených skutečností lze konstatovat, že stanovené cíle disertační práce byly splněny.

9.2 Souhrn nových poznatků a vlastní přínos

Přínos práce je v provedeném vývoji a vzniku nového matematického modelu nízkoteplotního palivového článku typu PEMFC, který byl vytvořen v MATLAB® a MATLAB®/Simulink a který umožňuje vyšetřování dynamického chování PEMFC v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Na základě zhodnocení současného stavu problematiky PEMFC v kapitolách 2, 3 a 6 představuje vyvinutý model komplexní simulační nástroj, který odstraňuje některé zjednodušující předpoklady publikovaných modelů a zároveň uvažuje i dynamické chování řady neelektrických parametrů článku. Vyvinutý model vychází z částečných řešení již verifikovaných modelů a respektuje vedle změn aktivačních ztrát, ohmických ztrát, koncentračních ztrát, vnitřního odporu či parciálních tlaků reaktantů, také samotnou změnu provozní teploty článku.

Dílčím přínosem práce je samotná identifikace nedostatků současných matematických modelů palivových článků. Vyvinutý model článku ovšem neeliminuje všechny specifikované nedostatky. Provedená identifikace nedostatků proto může přispět k dalšímu zdokonalení vyvinutého modelu, a to vždy podle požadavků a účelu uvažovaných simulací. Za dílčí přínos práce může být také považovaná implementace modelu snižujícího DC/DC konvertoru, který zvyšuje praktickou aplikovatelnost modelu v rámci hodnocení hybridního systému jako celku.

Přínosem je fakt, že paralelně s vyšetřováním vývoje teploty palivového článku je respektována skutečnost použití reforméru. Odborné publikace [32, 84], podle kterých byl model reforméru vytvořen, předpokládaly v simulacích konstantní teplotu článku. V případě využití PEMFC ke spolupráci s kogenerační jednotkou je znalost průběhu teploty článku nesmírně důležitým parametrem. Práce deklaruje, že konstrukční a materiálové modifikace palivového článku mají zcela zásadní dopad na vývoj provozní teploty článku a stanovení množství produkovaného tepla, jelikož přímo ovlivňují hodnoty výsledné tepelné kapacity a tepelného odporu. U analyzovaného článku popsaného v kapitole 6 byla při téměř 5% změně tepelného odporu zaznamenána změna teploty přibližně 1,8 K, což by u článku s nominálním výkonem necelých 2,0 kW představovalo změnu jeho nominálního výkonu o jednotky W. Při zvýšení tepelné kapacity o více jak 40 % bylo nominálního výkonu dosaženo rychleji a maximální změna výkonu ve zkoumaném časovém intervalu byla přibližně 10 W.

Přínos je možné shledat ve vytvoření matematického modelu fotovoltaického modulu v prostředí MATLAB® a MATLAB®/Simulink. Současné publikace často hodnoty sériového a paralelního odporu fotovoltaického modulu zanedbávají, stanovují experimentálně nebo považují za konstantní. Vytvořený model respektuje vliv teploty na hodnoty jednotlivých elektrických parametrů a využívá zdokonalené determinace sériového a paralelního odporu pomocí iteračního výpočtu vycházejícího pouze ze štítkových hodnot modulu.

Důležitá je i aplikace vytvořená v programu MATLAB®, která slouží pro zpracování dlouhodobě měřených dat. Aplikace pro zvolené časového období a požadovaný výkon

zpracovává databázi reálně měřených dat a provádí jejich analýzu. Aplikace je schopna například vyhodnotit celkovou dobu, po kterou byl fotovoltaický modul schopen dodávat konkrétní hodnotu minimálního výkonu za vybrané období. Výsledky v Tab. 7.7 [2] například ukazují, že fotovoltaický modul je v červnu provozován přes 47 hodin s výkonem větším než je $0,6 \cdot P_{max}$, oproti tomu v prosinci pouze přibližně 0,1 hodiny. Jedná se svým způsobem o jednoduchou aplikaci, která však poskytuje důležité informace pro vyhodnocení výkonové dostupnosti fotovoltaického zdroje energie.

Práce také obsahuje poznatky plynoucí z provedeného hodnocení relevance využití veřejné databáze PVGIS, jakožto technického podpůrného prostředku pro prvotní návrh FVE. Jelikož PVGIS představuje interaktivní mapu, která čerpá z dat získaných v období od 1981 až 1990 a má obecně přispět k navýšení podílu OZE v celkovém portfoliu výroben, popřípadě má pomoci objektivnímu hodnocení jednotlivých finančních rámců právě do FVE, bylo vhodné ji porovnat s reálně měřenými daty. Výsledky porovnání ukazují, že jsou data téměř identická a rozdíly jsou minimální.

9.3 Praktické využití

Obecně platí, že všechny v práci vytvořené matematické modely představující jednotlivé zdroje energie lze využít pro simulace hybridního systému s PEMFC a OZE.

Palivový článek typu PEMFC, který pracuje v rámci hybridního systému, není vhodný pro vykrývání náhlých výkonových špiček. Na PEMFC je nutné pohlížet více komplexně a hledat uplatnění i produkované tepelné energie. V případě využití PEMFC ke spolupráci s kogenerační jednotkou umožňuje model PEMFC vyšetřit provozní teplotu článku pro různé stavy zatížení. Výstupy simulací poskytují znalost průběhu teploty článku, jež představuje nesmírně důležitý parametr. Implementace modelu reforméru je vhodná pro získání představy o spotřebě zemního plynu.

Práce obsahuje verifikovaný matematický popis fotovoltaického modulu, který detailně přibližuje princip funkce modulu, ale také uvádí jednotlivé fyzikální závislosti a uvažované algoritmy, jež by bylo možné využít i v jiných simulačních prostředích. Prostřednictvím programovacího jazyka Fortran lze uplatnit detailní popis k implementaci do programu PSCAD, který v současné době u fotovoltaického modulu neuvažuje zdokonalený výpočet jeho jednotlivých odporů přímo ze štítkových hodnot a nerespektuje teplotní závislost odporů a napětí modulu.

Vytvořený model fotovoltaického modulu je podroben úspěšné verifikaci, což vede k možnosti jeho praktického využití v rámci simulací celého hybridního systému. Vedle toho byl model využit i jako podpůrný prostředek při vzniku funkčního vzorku laboratorního měřicího setu pro analýzu nízkovýkonových fotovoltaických modulů. Verifikace tohoto měřicího setu byla realizována na základě vytvořeného matematického modelu. Podrobnější informace o měřícím setu jsou uvedeny v [106], kde jsou rovněž představeny provedené experimenty. Doplňující informace jsou zaznamenány v [109].

Kombinace informací o výkonové dostupnosti a PVGIS přispěje k dosažení kom-

plexní představy, jak správně nadimenzovat a řídit hybridní systém obsahující FVE. Vytvořená aplikace řešící disponibilitu zdroje energie poslouží k lepšímu nastavení jednotlivých procesů řídicího algoritmu daného hybridního systému.

9.4 Návrh dalšího řešení

Práce identifikovala jednotlivé nedostatky současných matematických modelů PEMFC. Vyvinutý model PEMFC ovšem neeliminuje všechny nedostatky. Navazující výzkumné práce by se proto měly zabývat jejich další redukcí, ve formě jejich postupné implementace do modelu PEMFC nebo do modelu hybridního systému. Eliminace konkrétního nedostatku musí být realizována po zvážení jeho relevantnosti ve vazbě na provádění simulace a experimenty. Vzhledem k technickým a ekonomickým aspektům by bylo potřebné zaměřit se na prodloužení životnosti palivového článku, a to například formou nového řídicího algoritmu hybridního systému.

Další výzkumné práce by se mohly zabývat konkrétní podobou modelu hybridního systému. Ten by implementoval modely subsystémů představující jednotlivé typy energetických zdrojů a další potřebná zařízení. Samotné vytvoření dynamického modelu hybridního systému je velmi složitá a široká problematika, jelikož se musí respektovat řada vzájemných vazeb hned mezi několika obory. Je proto nutné detailně zhodnotit vývoj současných řídicích algoritmů. Vhodné je rovněž navrhnout a vytvořit zcela nový řídicí algoritmus hybridního systému. Hlavním rozhodovacím kritériem současných řídicích algoritmů je stav nabití baterií. Nový algoritmus by ze stavu nabití baterií vycházet nemusel. Dalším úkolem je také navrhnout a vytvořit modelové scénáře (změny atmosférických podmínek, výpadky, degradace), aby bylo možné spolehlivost algoritmu otestovat, modifikovat či ověřit jeho oprávněnost. Hlavní důraz u nového algoritmu by měl být přitom kladen na optimalizovaný provoz palivového článku, případně i elektrolýzeru.

Hybridní systém by mohl být také doplněn o modely subsystémů, které představují například malou vodní elektrárnu, akumulární zařízení nebo střídač. Přínosné by bylo i zdokonalení modelu větrného zdroje energie. Navazující výzkumné práce by měly obecně vést ke zdokonalování v práci provedených a modelovaných parciálních řešení. Případně jednotlivá řešení postupně implementovat i do dalších simulačních prostředí.

Rejstřík

- Aerodynamický model, 99
Aktivační ztráty, 38
Algoritmus řízení, 13
Bipolární deska, 30
CIS, 77
Czochralského metoda, 75
Drsnost povrchu, 105
Elektrody, 30
Elektrolyt, 31
Elektrolýza, 22
Faktor plnění, 86
Fotoelektrický jev, 72
Fotovoltaický proud, 78
GDL, 30
Gibbsova volná energie, 35
Grid-off, 11
Grid-on, 11
HAWT, 98
HIT, 77
Hydratace membrány, 55
Kogenerační jednotka, 9
Koncentrace reaktantů, 55
Koncentrační ztráty, 40
Konvertor, 69
Kryogenní zásobníky, 24
Křemík, 72
MCFC, 7
MEA, 31
Metan, 19
Metanizér, 19
Monokrystalický článek, 75
Nafion, 33
Nernstova rovnice, 37
NOCT, 80
Ohmické ztráty, 39
PAFC, 6
Parciální oxidace, 20
Parciální tlak reaktantu, 41
Parní reformování, 18
PEMFC, 29
P-N přechod, 72
Polykrystalické články, 76
Polymerní membrána, 32
PVGIS, 91
Reformér, 60
Rezistivita membrány, 40
Saturační proud, 80
SOFC, 7
STC, 80
Sulfovaný fluoropolymer, 32
Tepelná kapacita, 62
Tepelné napětí, 78
Tepelné ztráty, 42
Tepelný odpor, 62
Termodynamický potenciál, 34
Termochemické cykly, 21
Tlakové lahve, 24
Ultracapacitor, 12
Valenční pás, 73
VAWT, 98
Vnitřní energie, 34
Vodík, 17
Vodivostní pás, 73
Výkonový součinitel, 102
Vysokoteplotní elektrolýza, 22
Zakázaný pás, 73
Zemní plyn, 19
Zplyňování, 21

Použitá literatura

- [1] Di Dio, V., La Cascia, D., Miceli, R., Rando, C. A mathematical model to determine the electrical energy production in photovoltaic fields under mismatch effect. In *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on*, June 2009, pp. 46–51.
- [2] Ptáček, M., Novotný, J., Matoušek, A. Analýza fotovoltaické části multienergetického grid-off systému s palivovým článkem. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference Renewable Energy Sources 2010*. Tatranské Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, May 2010, s. 1–5, ISBN 978-80-89402-24-3.
- [3] Ptacek, M. The definition of input parameters for modelling of energetic subsystems. *EPJ Web of Conferences*, vol. 54, pp. 02 002.1–02 002.8, June 2013, ISSN 2100-014X.
- [4] Mastný, P., Drápela, J., Macháček, J., Ptáček, M., Radil, L., Bartošík, T., Pavelka, T., Mišák, S. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Ročník č.1. Praha, Česká republika: České vysoké učení technické v Praze, Prosinec 2011, ISBN 978-80-01-04937-2, 256 s.
- [5] Bellis, M. Hydrogen Fuel Cells - Where Do We Go From Here. [online]. [cit. 20.11.2011]. Dostupné na: <http://inventors.about.com/library/weekly/aa090299.htm>
- [6] Kala, P., Hicks, M. Proposal for Fuel Cell and Other Clean Fuel Powerd Ferries for Pearl Harbor. In *30th NDIA Environmental and Energy Symposium & Exhibition*, San Diego, 2004.
- [7] Fuel Cell Today Limited. Fuel Cell History - Fuel Cell Today. [online]. [cit. 19.8.2014]. Dostupné na: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/history>.
- [8] IEEE. Bacon's fuel cell - GHN: IEEE Global History Network. [online]. [cit. 31.8.2014]. Dostupné na: http://www.ieeeghn.org/wiki/index.php/Bacon%27s_Fuel_Cell.
- [9] Carter, D., Wing, J. The Fuel Cell Industry Review 2013. Fuel Cell Today. [online]. [cit. 20.6.2014]. 20 pp. Dostupné na: <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/industry-review>.
- [10] Vaněk, J., Křivík, P., Novák, V. *Alternativní zdroje energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2006, 159 s.
- [11] ENVIROS. Palivové články a jejich praktické využití. [online]. [cit. 19.8.2014]. Dostupné na: http://www.enviros.cz/palivove_clanky/3_vyuziti_palivovych_clanku.html.
- [12] Fuel Cell Today Limited. Fuel Cell History - Fuel Cell Today. [online]. [cit. 19.8.2014]. Dostupné na: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies>.
- [13] Oettel, C., Rihko-Struckmann, L., Sundmacher, K. High-Temperature PEM Fuel Cells(HT-PEMFC). [online]. [cit. 3.12.2011]. Dostupné na: <http://www.mpi-magdeburg.mpg.de/>.

- [14] FCTEC. Types of Fuel Cells. [online]. [cit. 10.11.2011]. Dostupné na: http://www.fctec.com/fctec_types.asp.
- [15] Ballard. Ballard - CLEARgen fuel cell1 MW. Product specifications. [online]. [cit. 12.9.2014]. Dostupné na: <http://www.ballard.com/fuel-cell-products/cleargen-multi-mw-systems.aspx>.
- [16] Renewable Energy Focus. Solvay unveils Nedstack 1 MW PEM fuel cell in operation. [online]. [cit. 12.9.2014]. Dostupné na: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/23702/solvay-unveils-nedstack-1-mw-pem-fuel-cell-in-operation/>.
- [17] Fuel Cells 2000. Edit Project - Fuel Cells 2000 Web. [online]. [cit. 12.9.2014]. Dostupné na: <http://www.fuelcells.org/db/project.cgim?id=1284>.
- [18] Fuel Cells 2000. Edit Project - Fuel Cells 2000 Web. [online]. [cit. 18.8.2014]. Dostupné na: <http://www.fuelcells.org/db/project.cgim?id=1315>.
- [19] Maeda, K., Suzuki, M., Aki, H. R&D and deployment of residential fuel cell cogeneration systems in Japan. In *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, July 2008, pp. 1–5, ISSN 1932-5517.
- [20] Marge, R. Analyst view: Residential Fuel Cell Field Trials in Europe. [online]. [cit. 13.09.2014]. 20 p. Dostupné na: www.fuelcelltoday.com.
- [21] Iqbal, M. Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy*, vol. 28, no. 2, 2003, pp. 223 – 237, ISSN 0960-1481.
- [22] Fuel Cell Today Limited. Hydrogenics Chosen for Wind Energy Storage Solution in North Rhine Westphalia. [online]. [cit. 18.8.2014]. Dostupné na: <http://www.fuelcelltoday.com/news-archive/2011/october/hydrogenics-chosen-for-wind-energy-storage-solution-in-north-rhine-westphalia>.
- [23] Ptacek, M., Pavelka, T., Novotny, J. The cooperation of fuel cells and renewable energy sources: A short review of operated energetics systems and their main deficiencies of pemfc models in hybrid systems. In *Electric Power Engineering (EPE), Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on*, vol. 1., Brno, Czech Republic, May 2014, pp. 363–366, ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [24] Deshmukh, M., Deshmukh, S. Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, 2008. pp. 235 – 249, ISSN 1364-0321.
- [25] Sharaf, A., Ozkop, E., Altas, I. A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme. In *Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada*, 2007, pp. 37–43, ISBN 978-1-4244-1444-4.

- [26] Schoenung, S., del Pilar Argumosa, M. Comparison of Stationary Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Systems. [cit. 31.8.2012]. 20 p. Dostupné na: www.fuelcellseminar.com/media/5076/dem33-3_schoenug.pdf.
- [27] Hansen, A. D., Sørensen, P., Hansen, L. H., Bindner, H. *Models for a Stand-Alone PV System*. Risø National Laboratory, Roskilde, Tech. Rep. Risø-R-1219 (EN)/SEC-R-12, December 2000, 78 p. Dostupné na: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:91233/datastreams/file_7727175/content.
- [28] Ptacek, M., Matousek, A. Modelling of Photovoltaic Array for Hybrid System. In *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011*, vol. 1. Ostrava, Czech Republic: VSB - Technical University of Ostrava, May 2011, pp. 1–4, ISBN 978-80-248-2393-5.
- [29] Cetin, E., Yilanci, A., Ozturk, H. K., Colak, M., Kasikci, I., Iplikci, S. A micro-DC power distribution system for a residential application energized by photovoltaic-wind/fuel cell hybrid energy systems. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 8, 2010, pp. 1344 – 1352, ISSN 0378-7788.
- [30] Khan, M., Iqbal, M. Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy*, vol. 30, no. 3, 2005, pp. 421–439, ISSN 0960-1481.
- [31] Onar, O., Uzunoglu, M., Alam, M. Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system. *Journal of Power Sources*, vol. 161, no. 1, 2006, pp. 707 – 722, ISSN 0378-7753.
- [32] Uzunoglu, M., Alam, M. Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 3, September 2006, pp. 767–775, ISSN 0885-8969.
- [33] Giannakoudis, G., Papadopoulos, A. I., Seferlis, P., Voutetakis, S. Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 3, 2010, pp. 872 – 891, ISSN 0360-3199.
- [34] Hyun, D. S., Hwang, H. J., Kim, D.U., Hwang, S., Yun, Y. H., Oh, B. S. Development of an optimal charging algorithm of a Ni-MH battery for stationary fuel cell/battery hybrid system application. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 21, 2013, pp. 9008 – 9015, ISSN 0360-3199.
- [35] Ptacek, M., Matousek, A. New Dynamic Model of Low-Temperature Fuel Cell Stack and the Micro-Cogeneration Systems. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 491–497, ISBN 978-80-214-4514-7.

- [36] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Elmasides, C. Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 16, 2009, pp. 7081 – 7095, ISSN 0360-3199.
- [37] Choe, G. Y., Kim, J. S., Kang, H. S., Lee, B. K., Lee, W. Y. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) modeling for high efficiency fuel cell balance of plant (BOP). In *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), October 2007, pp. 271–276.
- [38] Petrinec, K., Cirstea, M. Holistic Modelling of a Fuel Cell Power System and FPGA Controller using Handel-C. In *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, November 2006, pp. 4951–4954, ISSN 1553-572X.
- [39] Correa, J., Farret, F., Popov, V., Simoes, M. Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 1, March 2005, pp. 211–218, ISSN 0885-8969.
- [40] Haubrock, J., Heideck, G., Styczynski, Z. Dynamic Investigation on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems. In *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, June 2007, pp. 1–6, ISSN 1932-5517.
- [41] Jia, J., Yang, S., Wang, Y., Cham, Y. Matlab/Simulink based-study on PEM fuel cell and nonlinear control. In *Control and Automation, 2009. ICCA 2009. IEEE International Conference on*, December 2009, pp. 1657–1662.
- [42] Wang, C. *Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems*. Ph.D. dissertation, Montana State University, July 2006.
- [43] Saravanan, S., Thangavel, S. Instantaneous reference current scheme based power management system for a solar/wind/fuel cell fed hybrid power supply. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, 2014, pp. 155 – 170, ISSN 0142-0615.
- [44] Blažek, J., Rábl, V. *Základy zpracování a využití ropy*, Druhé vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, ISSN 80-7080-619-2, 107 s.
- [45] Petroleum.cz. Výroba vodíku parním reformováním. [online]. [cit. 31.8.2014]. Dostupné na: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>.
- [46] HyFLEET. On-site steam Reforming. [online]. [cit. 31.8.2014]. Dostupné na: <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/HydrogenProduction/reforming>.
- [47] Somolová, M., Dlouhý, P. Hytep.cz - výroba vodíku. [online]. [cit. 31.8.2014]. Dostupné na: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/491-vyroba-vodiku>.

- [48] Lee, S. H., Applegate, D. V., Ahmed, S., Calderone, S. G., Harvey, T. L. Hydrogen from natural gas: part I - autothermal reforming in an integrated fuel processor. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 8, 2005, pp. 829 – 842, ISSN 0360-3199.
- [49] Doucek, A.; Tenkrát, D.; Dlouhý, P. Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie. *Paliva*, č. 1, 2011, s. 1–7, ISSN 1804-2058.
- [50] Brown, L. F. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 26, no. 4, pp. 381 – 397, 2001.
- [51] Tuček, V., Dvořáková, L., Hanzal, J. Vodík. [online]. Česká asociace technických plynů. [cit. 16.08.2014]. 27 s. Dostupné na: <http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>.
- [52] Brandejská, E., Prokeš, O., Tenkrát, D. Získávání vodíku z obnovitelných zdrojů. V *Energie z biomasy V – odborný seminář*, Brno, 2006, s. 1–7.
- [53] Bača, P. Akumulace energie z OZE - vodíkové hospodářství. *TZB- info*, ročník 2, 2011, s. 1 – 10, ISSN 1801- 4399.
- [54] Green Car Congress. NEEL High-Temperature Electrolysis Demo Produces Hydrogen for Record 1,000 Hours. [online]. [cit. 19.8.2014]. Dostupné na: http://www.greencarcongress.com/2006/03/ineel_hightempe.html.
- [55] Vojtěch, D., Šerák, J., Michalcová, A., Morťaniková, M. Absorpce vodíku na kovových nanočásticích připravených selektivním loužením. V *Metal 2009*, Hradec nad Moravicí, 2009, ISSN 978-80-87294-03-1.
- [56] Dlouhý, P., Janík, L. Skladování vodíku I. [online]. [cit. 19.8.2014]. Dostupné na: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/412-skladovani-vodiku-i>.
- [57] Šváb, M. Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství. [online]. ČEA. Praha. 85 s. [cit. 16.08.2014]. Dostupné na: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>.
- [58] Ptacek, M., Mastny, P. The Investigation of Thermal Behaviour of the Low-Temperature Fuel Cell Stack by the Supplemented Dynamic Model. In *Recent Advances in Energy, Environment and Economic Development*. Paris, France: WSEAS Press, December 2012. pp. 160–165, ISBN 978-1-61804-139-5.
- [59] Ptacek, M., Matousek, A., The Implementation of the Dynamic Experiments of the Low-temperature Fuel Cell Stack with the Buck DC/DC Converter. In *Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2013*. Stará Lesná, Slovakia: Technical University of Košice, September 2013, pp. 200–203, ISBN 978-80-553-1441-9
- [60] Tesfahunegn, S., Vie, P., Undeland, T., Ulleberg, O. A combined steady state and dynamic model of a proton exchange membrane fuel cell for use in DG system simulation. In *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), June 2010, pp. 2457–2464.

- [61] Peraza, C., Diaz, J., Arteaga-Bravo, F., Villanueva, C., Gonzalez-Longatt, F. Modeling and simulation of PEM fuel cell with bond graph and 20sim. In *American Control Conference, 2008*, 2008, pp. 5104–5108, ISSN 0743-1619.
- [62] Ali, D. A simplified dynamic simulation model (prototype) for a stand-alone Polymer Electrolyte Membrane (PEM) fuel cell stack. In *Power System Conference, 2008. MEP-CON 2008. 12th International Middle-East*, March 2008, pp. 480–485.
- [63] Baker, R., Zhang, J. Electrochemistry Encyclopedia – PEM fuel cells. [online]. National Research Council of Canada. [cit. 13.09.2014]. Dostupné na: <http://archive.today/ss8s>.
- [64] Leroy, S. Membrane Electrode Assembly (MEA). [online]. National Research Council of Canada. [cit. 13.09.2014]. Dostupné na: <http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/programs/ifci/low-temperature-fuel-cells/membrane-electrode-assembly.html>.
- [65] Colleen, S. *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, 1st ed., May 2008, ISBN 978-0-12-374259-9, 456 p.
- [66] Sahu, A., Pitchumani S., Sridhar, P., Shukla, A. Nafion and modified-Nafion membranes for polymer electrolyte fuel cells: An overview. *Bulletin of Materials Science*, vol. 32, no. 3, 2009, pp. 285–294, ISSN 0250-4707.
- [67] Georgia State University, Department of Physics and Astronomy. Electrolysis of Water and Fuel Cell Operation. [online]. [cit. 1.12.2011]. Dostupné na: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/electrol.html>.
- [68] Brdička, R., Dvořák, J. *Základy fyzikální chemie*. Academica, 1977, ISBN 104-21-825, 852 s.
- [69] Papadopoulos, P., Marinopoulos, A., Papagiannis, G. Dynamic modelling of a grid-connected pem fuel cell in a distributed generation network. in *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), June 2009, pp. 1–8.
- [70] Khan, M. J., Iqbal, M. T. Dynamic modelling and simulation of a fuel cell generator. *Fuel Cells*, vol. 5, no. 1, 2005, pp. 97–104, ISSN 0960-1481.
- [71] Porš, Z. Palivové články. [online]. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s., Divize jaderné bezpečnosti a energetiky. 78 s. [cit. 31.8.2014]. Dostupné na: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>.
- [72] Horák, B., Koziorek, J., Kopřiva, M., Papoušek, M., Slanina, Z. *Studie pohonu mobilního prostředku s palivovým článkem*, Říjen 2005.
- [73] Barath, P. *Palivové články H₂-O₂ s anoxovou a bipolární membránou*. Dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Červen 2008.

- [74] Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A., Jensen, H. M., Peppley, B. A., Roberge, P. R. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell *Journal of Power Sources*, vol. 86, no. 1-2, 2000, pp. 173 – 180, ISSN 0378-7753.
- [75] Qingshan, X., Nianchun, W., Ichianagi, K., Yukita, K. PEM fuel cell modeling and parameter influences of performance evaluation. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, April 2008, pp. 2827–2832.
- [76] Gebregergis, A., Pillay, P., Bhattacharyya, D., Rengaswemy, R. Solid Oxide Fuel Cell Modeling. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 1, January 2009, pp. 139–148, ISSN 0278-0046.
- [77] Zhang, Z., Huang, X., Jiang, J., Wu, B. An improved dynamic model considering effects of temperature and equivalent internal resistance for PEM fuel cell power modules. *Journal of Power Sources*, vol. 161, no. 2, 2006, pp. 1062–1068, ISSN 0378-7753.
- [78] Padullés, J., Ault, G., McDonald, J. An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation. *Journal of Power Sources*, vol. 86, no. 1 - 2, 2000, pp. 495 – 500, ISSN 0378-7753.
- [79] Soltani, M., Bathae, S. A new dynamic model considering effects of temperature, pressure and internal resistance for PEM fuel cell power modules. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), April 2008, pp. 2757–2762.
- [80] Georgakis, D., Papathanassiou, S., Manias, S. Modeling and Control of a Small Scale Grid-connected PEM Fuel Cell System. In *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, June 2005, pp. 1614–1620.
- [81] Qu, S., Li, X., Hou, M., Shao, Z., Yi, B. The effect of air stoichiometry change on the dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 1, 2008, pp. 302 – 310, ISSN 0378-7753.
- [82] Park, S. K., Cho, E., Oh, I. H. Characteristics of membrane humidifiers for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 22, no. 6, 2005, pp. 877–881, ISSN 0256-1115.
- [83] Horák, B., Szeliga, Z., Kopřiva, M. *Studie instalace stacionárního vysokoteplotního palivového článku*, Listopad 2005.
- [84] El-Sharkh, M., Rahman, A., Alam, M., Sakla, A., Byrne, P., Thomas, T. Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, November 2004. pp. 2022–2028, ISSN 0885-8950.

- [85] Vielstich, W., Lamm, A., Gasteiger, H. A. *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, and Applications*, May 2003, ISBN 978-04-70723-11-1, 444 p.
- [86] Yalcinoz, T., Alam, M. Improved dynamic performance of hybrid PEM fuel cells and ultracapacitors for portable applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 7, 2008, pp. 1932–1940, ISSN 0360-3199.
- [87] Ptacek, M., Khisamutdinov, N. Comparison of Amount of Solar Energy of the Photovoltaic Panel in the Given Area. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. Tomsk, Russia: TPU Press, April 2010, pp. 14–16, ISBN 0-7803-8226-9
- [88] Goetzberger, A., Knobloch, J., Voss, B. *Crystalline silicon solar cells*. Academica, February 1998, ISBN 978-0-471-97144-3, 254 p.
- [89] Toušek, J., Toušková, J. Perspektiva využití fotovoltaických článků pro přeměnu sluneční energie. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, vol. 36, 1991, pp. 217 – 237, ISSN 0032-2423.
- [90] Society, T. G. E, *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*, 2nd ed. Earthscan, 2008, ISBN 978-1-84407-442-6, 384 p.
- [91] Altermatt, P. Altermatt Lecture Series. [online]. [cit. 16.08.2014]. Dostupné na: <http://www.pvlighthouse.com.au/resources/courses/altermatt/altermatt>
- [92] Honsberg, C., Bowden, S. PVCDROM. A collection of resources for the photovoltaic educator. [online]. [cit. 16.08.2014]. Dostupné na: <http://www.pveducation.org/>.
- [93] Burley, I., Carrington, M., Kobes, R., Kunstatter, G. The Photoelectric Effect. [online]. [cit. 30.9.2014]. Dostupné na: <http://theory.uwinnipeg.ca/physics/quant/node3.html>.
- [94] National Renewable Energy Laboratory. Best research-cell efficiencies. [online]. [cit. 20.9.2014]. Dostupné na: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
- [95] Wolf, P. *Modelování fotovoltaických článků a panelů v podmínkách nerovnoměrného rozložení teploty a intenzity záření*. Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Srpen 2013.
- [96] Haselhuhn, R. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. První vydání, Ostrava: HEL, 2011, ISBN 978-80-86167-33-6, 176 s.
- [97] Cocks, F., Pollock, J., Bailey, J. Preparation of in situ composites by edge-defined, film-fed growth (EFG) directional solidification. In *Proceedings of the Conference on In Situ Composites*, vol. Vol. I. Lakeville Connecticut: National Academy of Sciences - National Academy of Engineering, September 1973, pp. 141–156, ISBN 104-21-825.
- [98] Kaplanis, S., Kaplani, E. *Renewable Energy Systems: Theory, Innovations and Intelligent Applications*. Nova Science Pub Inc, June 2013, ISBN 978-1-62417-741-5, 591 p.

- [99] Yu, T. C., Chien, T. S. Analysis and simulation of characteristics and maximum power point tracking for photovoltaic systems. In *Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009. International Conference on*, November 2009, pp. 1339–1344.
- [100] Villalva, M., Gazoli, J., Filho, E. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 5, May 2009, pp. 1198–1208, ISSN 0885-8993.
- [101] Tsai, H. L., Tu, C. S., Su, Y. J. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. In *Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2008*, 2008, pp. 846–851.
- [102] da Costa, W., Fardin, J., Simonetti, D. S. L., Neto, L. V. Identification of photovoltaic model parameters by Differential Evolution. In *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*, March 2010, pp. 931–936.
- [103] Ahmed, N. A., Al-Othman, A., AlRashidi, M. Development of an efficient utility interactive combined wind/photovoltaic/fuel cell power system with MPPT and DC bus voltage regulation. *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 5, 2011, pp. 1096 – 1106, ISSN 0378-7796.
- [104] Kyocera Solar Deutschland. Photovoltaic module KD235GH-2PB, Datasheet. [online]. [cit. 13.1.2011]. Dostupné na: <http://www.kyocerasolar.de/>.
- [105] Ptáček, M. Návodů laboratorních úloh pro výuku vodíkových a fotovoltaických technologií. [online]. ÚEEN, FEKT, VUT v Brně. [cit. 29.6.2014]. Dostupné na: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/index.php/h2-a-fve-menu-ke-stazeni>.
- [106] Ptacek, M., Pavelka, T., Matousek, A. The Verification of Validity of the Low-Cost Laboratory Measuring Set for Analysis of Low-Power Photovoltaic Modules. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 485–489, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [107] Kaushika, N., Gautam, N. Energy yield simulations of interconnected solar PV arrays. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 1, March 2003, pp. 127–134, ISSN 0885-8969.
- [108] González-Longatt, F. M. Model of Photovoltaic Module in MatlabTM. In *2do Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (II CIBELEC 2005)*, Puerto la Cruz – Venezuela, 2006.
- [109] Pavelka, T., Ptacek, M., Baxant, P. Photometrical Parameters of the Luminaire Used for Laboratory Measure of Low-Power Photovoltaic Modules. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and

- Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 1181–1184, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [110] Ústav elektroenergetiky. VUT v Brně. Laboratoř nekonvenčních přeměn. [online]. [cit. 20.8.2014]. Dostupné na: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/laboratory-of-unconventional-energy-conversion/index.php>.
- [111] Suri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D., Ossenbrink, H. A. Potential of solar electricity generation in the european union member states and candidate countries. *Solar Energy*, vol. 81, no. 10, October 2007 pp. 1295 – 1305, ISSN 0038-092X
- [112] Suri, M., Remund, J., Cebecauer, T., Dumortier, D., Wald, L., Huld, T., Blanc, P., *et al.* First steps in the cross-comparison of solar resource spatial products in Europe. In *Proceeding of the EUROSUN 2008, 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings*. Lisabon, Portugal: Sociedade Portuguesa de Energia Solar, October 2008, ISBN 978-16-178-2228-5.
- [113] European Commission, J. R. C. Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. [online]. Institute for Environment and Sustainability Renewable Energies Unit. [cit. 20.4.2011]. Dostupné na: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.
- [114] Yu, G., Jung, Y., Choi, J., Kim, G. A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms. *Solar Energy*, vol. 76, no. 4, 2004, pp. 455 – 463, ISSN 0038-092X.
- [115] Hořava, P. *Simulace malé větrné elektrárny se Savoniovým-Darrieovým rotorem*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 51 s.
- [116] Manyonge, A. W., Ochieng, R. M., Onyango, F. N., Shichikha, J. M. Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis *Applied Mathematical Sciences*, vol. 6, no. 91, 2012, pp. 4527 – 4536..
- [117] Hansen, M. O. L. *Aerodynamics of Wind Turbines*, Earthscan, 2008, ISBN 978-1849-77040-8, 181 p.
- [118] Kothari, D. P., Signal, K. C., Ranjan, R. *Renewable Energy Sources And Emerging Technologies*. Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, October 2009, ISBN 978-8-1203-3357-4, 350 p.
- [119] Johnson, K. E. *Adaptive Torque Control of Variable Speed Wind Turbines. Technical Report. NREL/TP-500-36265*, August 2004, 106 p.
- [120] Biadgo, A. M., Simonovic, A., Komarov, D., Stupar, S. Numerical and Analytical Investigation of Vertical Axis Wind Turbine *FME Transactions*, vol. 41, 2013, pp. 49 – 58, ISSN 1451-2092.
- [121] Vihriälä, H., *Control of Variable Spe Win Turbine*. Ph.D. dissertation, Tampere University of Technology, November 2002.

- [122] El-Sattar, A. A., Saad, N. H., Shams El-Dein, M. Z. Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault *Electric Power Systems Research*, vol. 78, July 2008, pp. 1240–1246.
- [123] Zhang, J., Cheng, M., Chen, Z., Fu, X. Pitch angle control for variable speed wind turbines. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, April 2008, pp. 2691–2696.
- [124] Borowy, B. S., Salameh, M. Dynamic Response of a Stand-Alone Wind Energy Conversion System with Battery Energy Storage to a Wind Gust. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 12, March 1997, pp. 73–78, ISSN 0885-8969.
- [125] Perdana, A., Carlson, O., Persson, J. Dynamic response of grid connected wind turbine with doubly fed induction generator during disturbances. In *Nordic workshop on power and industrial electronics*, March 2004, pp. 1–6.
- [126] Gagnon, R., Sybille, G., Bernard, S., Paré, D., Casoria, S., Larose, C. Modeling and Real-Time Simulation of a Doubly-Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine. In *International Conference on Power Systems Transients IPST'05*, June 2005.
- [127] Petrů, T. *Modeling of wind turbines for power system studies*. Ph.D. dissertation, Chalmers University of Technology, 2003.
- [128] Šantín, V. *Simulace jevů způsobených připojováním a provozem větrných elektráren a farem*. Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, Květen 2012.
- [129] Altunkaynak, A., Erdik, T., Dabanli, I., Sen, Z. Theoretical derivation of wind power probability distribution function and applications. *Applied Energy*, vol. 92, April 2012, pp. 809 – 814, ISSN 0306-2619.
- [130] Michaliczek, J. *Synchronní generátor s permanentními magnety a aktivním usměrňovačem*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013, 70 s.
- [131] Topolánek, D., Šlezinger, J. Systém malé větrné elektrárny s axiální osou rotace. popis měřicího systému a parametrů větrné elektrárny. [online]. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 16.08.2014]. 24 s. Dostupné na: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/Savonius/Files/Prirucka_systemu_VE.pdf.
- [132] Bianchi, N., Bolognani, S., Fornasiero, E., Morandín, M., Pavesi, G. Optimal drive and machine sizing for a self starting, vertical axis, low power wind generator. In *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International*, September 2012, pp. 178–183.

Publikace autora

- [A.1] Ptacek, M., Pavelka, T., Novotny, J. The cooperation of fuel cells and renewable energy sources: A short review of operated energetics systems and their main deficiencies of pemfc models in hybrid systems. In *Electric Power Engineering (EPE), Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on*, vol. 1., Brno, Czech Republic, May 2014, pp. 363–366, ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [A.2] Kopicka, M., Ptacek, M., Toman, P. Analysis of the Power Quality and the Impact of Photovoltaic Power Plant Operation on Low-Voltage Distribution Network. In *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2014*, Rakvere, Estonia, June 2014, pp. 99–102, ISBN 978-1-4799-5020-1.
- [A.3] Ptacek, M., Matousek, A. The Implementation of the Dynamic Experiments of the Low-temperature Fuel Cell Stack with the Buck DC/DC Converter. In *Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2013*. Stará Lesná, Slovakia: Technical University of Košice, September 2013, pp. 200–203, ISBN 978-80-553-1441-9
- [A.4] Ptacek, M. The definition of input parameters for modelling of energetic subsystems. *EPJ Web of Conferences*, vol. 54, pp. 02 002.1–02 002.8, June 2013, ISSN 2100-014X.
- [A.5] Ptacek, M., Matousek, A. New Dynamic Model of Low-Temperature Fuel Cell Stack and the Micro-Cogeneration Systems. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 491–497, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [A.6] Ptacek, M., Mastny, P. The Investigation of Thermal Behaviour of the Low-Temperature Fuel Cell Stack by the Supplemented Dynamic Model. In *Recent Advances in Energy, Environment and Economic Development*. Paris, France: WSEAS Press, December 2012. pp. 160–165, ISBN 978-1-61804-139-5.
- [A.7] Ptacek, M., Pavelka, T., Matousek, A. The Verification of Validity of the Low-Cost Laboratory Measuring Set for Analysis of Low-Power Photovoltaic Modules. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 485–489, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [A.8] Pavelka, T., Ptacek, M., Baxant, P. Photometrical Parameters of the Luminaire Used for Laboratory Measure of Low-Power Photovoltaic Modules. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 1181–1184, ISBN 978-80-214-4514-7.

- [A.9] Ptacek, M., Matousek, A. Modelling of Photovoltaic Array for Hybrid System. In *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011*, vol. 1. Ostrava, Czech Republic: VSB - Technical University of Ostrava, May 2011, pp. 1–4, ISBN 978-80-248-2393-5.
- [A.10] Mastný, P., Drápela, J., Macháček, J., Ptáček, M., Radil, L., Bartošík, T., Pavelka, T., Mišák, S. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Ročník č.1. Praha, Česká republika: České vysoké učení technické v Praze, Prosinec 2011, ISBN 978-80-01-04937-2, 256 s.
- [A.11] Ptáček, M., Paar, M. Aplikace genetického algoritmu pro optimalizaci provozu distribuční sítě. *Elektrotechnika a informatika 2011 část třetí - Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Říjen 2011, s. 49–52., ISBN 978-80-261-0017-1.
- [A.12] Ptáček, M., Novotný, J., Matoušek, A. Analýza fotovoltaické části multienergetického grid-off systému s palivovým článkem. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference Renewable Energy Sources 2010*. Tatranské Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, May 2010, s. 1–5, ISBN 978-80-89402-24-3.
- [A.13] Ptacek, M. Analysis of the Consequences of Black-out at the Dukovany Nuclear Powerstation. In *Second Forum of Young Researchers*, Izhevsk, Russia: Publishing House of Izhevsk State Technical University, April 2010, pp. 382–388, ISBN 978-5-7526-0442-3.
- [A.14] Ptacek, M., Khisamutdinov, N. Comparison of Amount of Solar Energy of the Photovoltaic Panel in the Given Area. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. Tomsk, Russia: TPU Press, April 2010, pp. 14–16, ISBN 0-7803-8226-9
- [A.15] Khisamutdinov, N., Ptacek, M. Production condition analysys of cogeneration units. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. Tomsk, Russia: TPU Press, April 2010, pp. 194–196, ISBN 0-7803-8226-9
- [A.16] Ptacek, M., Matousek, A. Cascade and Independent Malfunctions and Damages of Safety Systems in Terms of a Nuclear Accident. In *Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010*, Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, May 2010, pp. 623–627, ISBN 978-80-214-4094-4.
- [A.17] Ptacek, M. Variants of Repair Diesel Generator in Terms of Nuclear Accidents. In *Proceedings of the 16th Conference Student EEICT 2010*, vol. 4, Brno, Czech Republic, April 2010, pp. 157–161, ISBN 978-80-214-4079-1.
- [A.18] Ptacek, M., Novotny, J., Matousek, A. Analysis of the Photovoltaic Source of Multi-energy Grid-off System with Fuel Cell. In *Volume of Abstract of the 1st International Scientific Conference OZE 2010 RENEWABLE ENERGY SOURCES 2010*, Tatranské Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, May 2010, p. 47–48, ISBN 978-80-89402-21-2.

- [A.19] Novotný, J., Ptáček, M., Matousek, A. RES in electricity system. In *Volume of Abstract of the 1st International Scientific Conference OZE 2010 RENEWABLE ENERGY SOURCES 2010*, Tatranské Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, May 2010, p. 33–34, ISBN 978-80-89402-21-2.
- [A.20] Novotný, J., Ptáček, M., Matoušek, A. Obnovitelné zdroje v elektrizační soustavě. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference Renewable Energy Sources 2010*, Tatranské Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, May 2010, s. 1–5., ISBN 978-80-89402-24-3
- [A.21] Ptáček, M. Optimalizace prací na obnově elektrizačních sítí při nadprojektové havárii v EDU. *Proceedings of the 15 th Conference Student EEICT 2009*, ročník 2, Brno, Czech Republic, Duben 2009, s. 126–124, ISBN 978-80-214-3868-2.

Curriculum Vitae

Osobní data

Michal Ptáček, Ing.

Zikova 604/6

779 00 Olomouc

Narozen dne 10. 02. 1985 ve Šternberku
svobodný, národnost česká

Tel.: +420 541 146 247

E - mail: ptacekm@feec.vutbr.cz, ptacekmic@gmail.com



Vzdělání

- 2009 – 2014 doktorské studium na VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika
- 2007 – 2009 magisterské studium na VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Elektroenergetika
- 2004 – 2007 bakalářské studium na VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Zahraniční stáže

- 07/2014 vědecko-výzkumná činnost, University of Massachusetts, Lowell, Spojené státy americké
- 02/2012 – 06/2012 vědecko-výzkumná činnost, Technological Educational Institute of Crete, Branch of Chania, Řecko

Praxe

- 09/2013 – dosud výzkumný asistent, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky (do 09/2013 úvazek 0,3, do 12/2013 0,4 a dále 0,5).
- 02/2012 – dosud technicko-hospodářský pracovník, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky (úvazek 0,2).
- 09/2010 – 12/2013 výzkumný asistent, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Centrum výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie (do 06/2011 úvazek 0,25, do 12/2012 úvazek 0,5, dále 0,2).
- 2009 – dosud konzultant ve vzdělávací agentuře PhDr. Ludmila Hlavinková (LP-efekt), Olomouc (dohoda o provedení práce).
- 10/2009 – 01/2012 administrátor uživatelských aplikací, E.on Česká republika, s.r.o., divize Projekty a data měření (úvazek 0,5).
- 2006 – 2008 živnostník v oboru vzdělávání dospělých, Vzdělávací agentura Michal Ptáček, Olomouc.

Projekty

- 07/2014 – dosud Technologická agentura České republiky, Prvky pro zavedení Smart Grids v distribučních sítích, Označení projektu: TA04021490, spoluřešitel
- 09/2013 – dosud Technologická agentura České republiky, Dynamický model distribuční sítě, Označení projektu: TA03020523, spoluřešitel
- 01/2013 – 12/2013 Fond rozvoje vysokých škol, Tvorba nových laboratorních úloh a podpůrných materiálů pro výuku ekologie v elektroenergetice, Označení projektu: 728/2013/G1, 2. spoluřešitel projektu
- 01/2012 – 12/2012 Fond rozvoje vysokých škol, Inovace laboratorní výuky zaměřené na provoz transformátorů, Označení projektu: 2484/2012/G1, řešitel
- 01/2011 – 12/2013 Vysoké učení technické v Brně - Vnitřní projekty VUT, Výzkum bezpečnosti, spolehlivosti a efektivnosti elektroenergetických systémů, Označení projektu: FEKT-S-11-19 , spoluřešitel
- 01/2011 – 12/2011 Fond rozvoje vysokých škol, Inovace laboratorní výuky vodíkových a fotovoltaických technologií, Označení projektu: 2121/2011/G1, řešitel
- 01/2010 – 12/2010 Vysoké učení technické v Brně - Vnitřní projekty VUT, Výzkum spolehlivosti, bezpečnosti a efektivnosti energetických systémů, Označení projektu: FEKT-S-11-2, spoluřešitel

Pedagogická činnost

- 2009 – 2014 Vedení přednášek v kurzu Ekonomika a ekologie v elektroenergetice (BEEE/KEEE). Vedení cvičení odborného základu v kurzech Přenosové sítě (MPRS/LPRS), Distribuce elektrické energie (BDEE/KDEE), Ekologie v elektroenergetice (BEKB) a Ekonomika a ekologie v elektroenergetice. Vedení laboratorní výuky v kurzech Elektrárny a teplárny (MELE/LELE), Přenosové sítě, Distribuce elektrické energie a Ekologie v elektroenergetice. Vedení počítačového cvičení v kurzech Přenosové sítě, Distribuce elektrické energie a Elektrárny a teplárny. Participace na laboratorní výuce kurzu Elektrické stanice a vedení (MESV). Participace na počítačových cvičení kurzu Počítače a programování 2 (BPC2)
- 2010 – 2014 Vedení bakalářských prací a diplomové práce

Ostatní

- 05/2014 – dosud člen Czech Young Generation (CYG)
- 2014 koordinátor za ÚEEN při tvorbě přihlášek projektu TA ČR - program Epsilon - 1. veřejná soutěž (projekty TH01021283, TH01020648, TH01020327, TH01020462 a TH01020799)
- 2009 – dosud účast na českých a mezinárodních odborných konferencích a školeních (WSEAS, EPE, CIGRE, ČK CIRED, IVC, Dny kogenerace a další)

- 2014 absolování 2nd Science and Energy Seminar at Ecole de Physique, Les Houches, Francie
- 2013 podílení se na realizaci vzdělávacích seminářů - odborně a prakticky zaměřených pro pracovníky v elektroenergetice
- 2013 koordinátor za ÚEEN při tvorbě přihlášek projektu TA ČR - program Alfa - 4. veřejná soutěž (projekty TA04020758, TA04021490 a TA04021491)
- 2013 koordinátor za ÚEEN při tvorbě přihlášky projektu TA ČR - Centra kompetence (projekt TE02000226)
- 2013 účast na jednání RECOM CZ-AT (Regional Cooperation Management) - Workshop síťové setkání na téma obnovitelné zdroje energie/ efektivní využitelnost, Großschönau, Rakousko
- 05/2012 – 12/2012 člen European Physical Society (EPS)
- 01/2012 – 12/2013 oponent projektů Fondu rozvoje vysokých škol - skupina G1
- 2012 – 2014 recenzent příspěvků konference a soutěže studentské tvůrčí činnosti STUDENT EEICT
- 2012 zkušenost s podáním přihlášek projektů TA ČR - program Alfa - 3. veřejná soutěž (projekt TA03020523)
- 2012 absolování Joint EPS-SIF International School on Energy, 2. místo v soutěži odborných příspěvků, Varenna, Itálie
- 2010 absolování kurzu základy vědecké práce na Akademii věd v Brně
- 2009 účast na Letní univerzitě v Dukovanech, Dukovany
- 2009 vítěz v soutěži diplomových prací Cena nadace ČEZ 2009, kategorie Dozimetrie a aplikace ionizačního záření, Praha
- 2008 účast na Letní škole jaderného inženýrství, Počátky u Pelhřimova
Jazykové znalosti: Angličtina

Brno, 11. listopadu 2014