

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Michal Miloslav Uličný

Autoreferát dizertačnej práce

Modelovanie a numerické simulácie PEM
palivového článku

na získanie akademického titulu

„doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

V doktorandskom študijnom programe:	mechatronické systémy
V študijnom odbore:	kybernetika
Forma štúdia:	denná
Miesto a dátum:	Bratislava 10.7.2025

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava

Predkladateľ:

Ing. Michal Miloslav Uličný
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava

Školiteľ:

prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava

Oponenti:

doc. Ing. Milan Naď, CSc.
Ústav aplikovanej informatiky,
automatizácie a mechatroniky
Materiálovotechnologická fakulta so
sídлом v Trnave
Slovenská technická univerzita v
Bratislave
Jána Bottu 25, 917 24 Trnava

Ing. Rastislav Ďuriš, PhD.
Ústav aplikovanej informatiky,
automatizácie a mechatroniky
Materiálovotechnologická fakulta so
sídлом v Trnave
Slovenská technická univerzita v
Bratislave
Jána Bottu 25, 917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa o hod.
na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 841 04
Bratislava, v miestnosti

.....
prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

Abstrakt

Táto dizertačná práca sa venuje modelovaniu a simuláciám palivových článkov s membránou prepúšťajúcou protóny (PEMFC) pomocou Computational Fluid Dynamics (CFD). PEMFC predstavujú perspektívny bezemisný zdroj energie, pričom ich efektívny návrh vyžaduje porozumenie komplexným fyzikálnym dejom. Cieľom práce je vytvoriť a overiť metodiky tvorby výpočtovej siete a simulácie kľúčových dejov v PEMFC. Súčasťou riešenia je citlivostná analýza hustoty siete, porovnanie vplyvu modelových rovníc a analýza vplyvu rôznych geometrických konfigurácií plynových kanálikov. Metodiky sú následne overené na vlastnom návrhu alternatívnej geometrie. Výsledky potvrdzujú význam vhodnej voľby modelov a geometrie pre presnosť simulácií a zároveň preukazujú prenositeľnosť navrhnutých prístupov na rôzne konfigurácie PEMFC.

Kľúčové slová

palivový článok, PEMFC, modelovanie, simulácia, CFD

Obsah

Úvod	5
1 PEM palivové články (PEMFC)	6
1.1 Princíp PEMFC	6
1.2 Deje v PEMFC	7
1.3 Modelovanie PEMFC a ich dejov	7
1.4 Súčasný stav a výzvy	8
2 Realizácia práce	9
2.1 Definovanie cieľov dizertačnej práce	9
2.2 Metodika tvorby výpočtovej siete	9
2.3 Metodika simulovania kľúčových dejov	14
2.3.1 Referenčný prevádzkový stav PEMFC	14
2.3.2 Problematika konverencie riešenia	14
2.3.3 Návrh metodiky simulovania kľúčových dejov	16
2.4 Citlivostná analýza hustoty prvkov v modeli	17
2.5 Analýza vplyvu modelových rovníc na kvalitu výsledkov	18
2.5.1 Vplyv všetkých rovníc (referenčný stav)	19
2.5.2 Prípadové štúdie	22
2.5.3 Zhodnotenie vplyvu modelových rovníc	25
2.6 Vplyv geometrických konfigurácií PEMFC	25
2.7 Návrh geometrie inšpirovanej zlatým rezom	27
2.8 Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov	29
Záver	30
Literatúra	32
Použitie nástrojov umelej inteligencie	35
Zoznam publikácií autora	36

Úvod

Táto dizertačná práca sa zaoberá komplexným modelovaním a simuláciou palivových článkov s membránou prepúšťajúcou protóny (PEMFC) pomocou Computational Fluid Dynamics (CFD). Palivové články predstavujú z hľadiska ekológie perspektívny bezemisný zdroj energie a sú súčasťou celosvetových snáh o dekarbonizáciu energetiky a dopravy. Aj keď existuje viacero typov palivových článkov, všetky pracujú na rovnakom princípe, premieňajú chemickú energiu paliva na elektrickú energiu. Táto práca sa zameriava na typ PEMFC, ktorý sa v súčasnosti javí ako najvhodnejší pre mobilné aplikácie, najmä v oblasti elektromobility. V tejto oblasti môže PEMFC nahradiť konvenčné spalovacie motory a zároveň eliminovať potrebu nadmerne veľkých batériových systémov v elektromobiloch.

Funkcia PEMFC závisí od správneho fungovania všetkých jeho podsystémov vrátane dodávky paliva, oksyľčovadla a chladenia. Deje prebiehajúce vo vnútri PEMFC sú vysoko komplexné, keďže sú ovplyvňované termodynamickými, elektrochemickými aj transportnými dejmi. Každý z týchto dejov spadá do inej oblasti fyziky či chémie, no predsa sú vzájomne previazané. Ich správne zachytenie a popis sú kľúčové pre návrh a bezpečnú prevádzku systémov s PEMFC. Pre tento účel slúži modelovanie, teda popis správania sa reálneho systému buď fyzickým modelom (napr. zmenšenou konštrukciou), alebo matematickým modelom založeným najčastejšie na diferenciálnych rovniciach. Vzhľadom na zložitosť systémov je analytické riešenie matematických modelov často nemožné, preto sa využívajú numerické metódy, ktoré umožňujú získať približné, no pre inžiniersku prax dostatočne spoľahlivé výsledky. Ich riešením formou simulácie je možné znížiť náklady, urýchliť vývoj a minimalizovať množstvo použitých materiálov. Pre úlohy prúdenia, pod ktoré spadá aj prevádzka PEMFC, sa s veľkou výhodou využíva numerická metóda konečných objemov, ktorá sa implementuje pomocou CFD.

Hlavným cieľom predkladanej dizertačnej práce je vytvoriť metodiky modelovania PEMFC a overiť ich pomocou numerických simulácií realizovaných v prostredí ANSYS Fluent. Táto práca sa primárne sústreďuje na kvalitné vytvorenie výpočtovej siete, následnú spoľahlivú simuláciu kľúčových fyzikálno-chemických procesov prebiehajúcich v PEMFC a napokon na analýzu prípadových štúdií v závislosti od uvažovaných modelových rovníc. Významnou súčasťou je aj analýza vplyvu rôznych geometrií plynových kanálikov na prúdenie a účinnosť systému. V práci sú simulované štandardné aj alternatívne typy kanálikov, pričom autor navrhol aj vlastnú konfiguráciu geometrie s cieľom overiť robustnosť a prenositeľnosť vytvorenej metodiky.

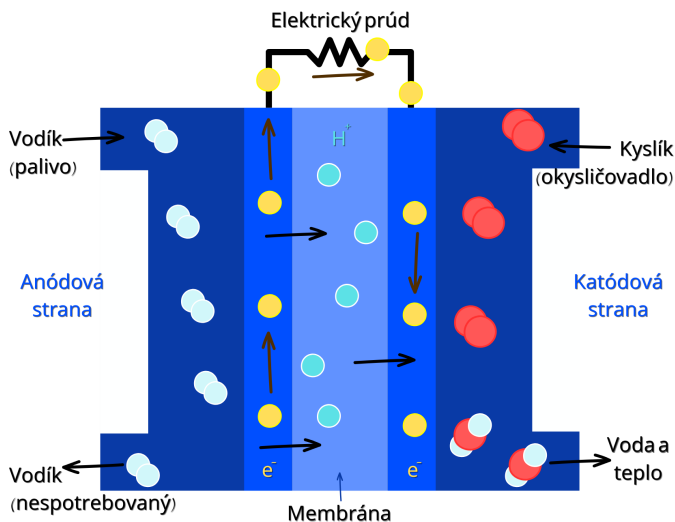
1 PEM palivové články (PEMFC)

Palivové články predstavujú technológiu spájajúcu rôznorodé javy, vyžadujúcu výskum v oblastiach ako elektrochémia, multifyzika a materiálová technológia [1].

Očakáva sa, že PEMFC budú čoraz významnejším zdrojom energie v rôznych aplikáciách, vrátane mobility a prenosných zariadení, s uplatnením aj v kozmonautike či námorníctve. Hlavnou prekážkou ich širšieho nasadenia je vysoká cena spôsobená drahými materiálmi, ako je platina. Pre dopravu je kľúčová aj infraštruktúra, ktorej vybudovanie je technologicky a finančne pomerne náročný proces [2, 3].

1.1 Princíp PEMFC

Princíp palivových článkov spočíva v premene chemickej energie dvoch reaktantov (palivo a okysličovadlo) na elektrickú energiu [4], čo je zobrazené na Obr. 1. Systém vyžaduje kontinuálny prísun vstupov, pričom dochádza k redoxnej reakcii na molekulárnej úrovni, kde elektróny z paliva vytvárajú prúd a z oxidovaného paliva a okysličovadla vzniká voda a uvoľňuje sa teplo [5].

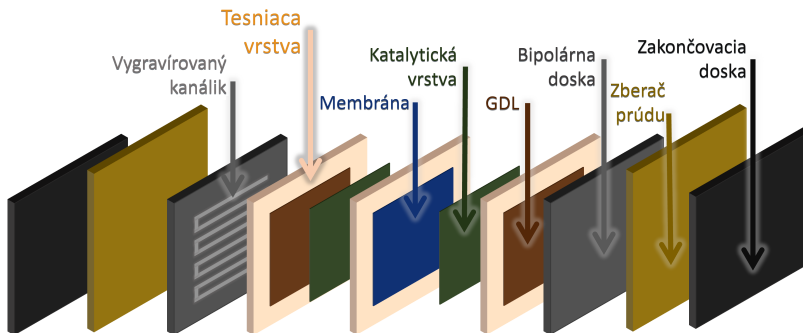


Obr. 1: Princíp vodíkoveho palivového článku

Táto práca sa zameriava na PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), ktorých jadro tvorí anóda, katóda a membrána. Na anóde prebieha oxidácia paliva a uvoľnené elektróny prechádzajú vonkajším obvodom na katódu, kde prebieha

redukcia oksyľičovadla a tvorba vody. Elektrolyt prepúšťa len kladné častice, teda protóny. Uplatnenie majú v elektromobilitě, elektrárňach či kozmonautike [4–6].

Komponenty PEMFC sú schematicky znázornené na Obr. 2, kde je vidieť symetrické usporiadanie okolo centrálnej membrány. Bipolárne dosky sa budú označovať ako BPP, vrstvy difúzie plynu ako GDL a katalytické vrstvy ako Kat. Označenie A alebo C za komponentom bude symbolizovať anódovú alebo katódovú časť.



Obr. 2: Komponenty PEM palivového článku

1.2 Deje v PEMFC

Deje v PEMFC sú komplexné a previazané fyzikálne a chemické zákony, ktoré sú základom ich fungovania. Rozdeliť sa dajú na tri hlavné oblasti:

- Termodynamické deje: Termodynamika opisuje premenu energie [7]. Keďže PEMFC transformujú chemickú energiu na elektrickú, termodynamika je kľúčová pre pochopenie ich činnosti a teoretických či prevádzkových limitov.
- Elektrochemické deje: Reakčná kinetika sa zaoberá dynamikou elektrochemických procesov. V PEMFC dochádza k prenosu elektrónov medzi povrchom elektródy a reaktantom, čo vytvára elektrický prúd [8].
- Transportné deje: Pre nepretržitú produkciu elektrickej energie sú nevyhnutné transportné procesy. Vyžadujú neustále privádzanie reaktantov do PEMFC a presun elektrických nábojov cez vonkajší obvod späť do systému [8].

1.3 Modelovanie PEMFC a ich dejov

Modelovanie v inžinierskom kontexte predstavuje matematický popis reality, pričom jeho počítačové riešenie sa nazýva simulácia. Tento prístup je kľúčový pre úsporu nákladov a času, ako aj zvýšenie bezpečnosti pri vývoji. Vyžaduje však hlboké pochopenie fyzikálnych javov a simulačných nástrojov.

V kontexte PEMFC je modelovanie nevyhnutné pre výskum a vývoj, pretože pomáha pochopiť fyzikálno-chemické procesy. Proces začína definovaním relevantných účinkov okolia na systém a ich matematickým opisom, najčastejšie pomocou parciálnych diferenciálnych rovníc, ako sú Navier-Stokesove rovnice [9]. Pre ich riešenie sa využívajú numerické metódy (simulácie). Po simulácii nasleduje validácia porovnaním s experimentálnymi dátami a verifikácia výpočtu [6].

Modelovanie PEMFC možno realizovať na rôznych úrovniach [10]: buď na systémovej úrovni, kde sa skúma interakcia jednotlivých blokov prostredníctvom ich vstupov a výstupov, alebo na detailnej úrovni, ktorá sa zameriava na zachytenie priestorového rozloženia fyzikálnych parametrov vnútri systému. V oboch prípadoch je cieľom matematického modelovania vykonať jeho simuláciu.

Základom každej CFD simulácie je sústava parciálnych diferenciálnych rovníc (PDE), ktoré vyjadrujú zákony zachovania hmotnosti, hybnosti a energie v prúdiacom médiu. Pomocou metódy konečných objemov sa tieto rovnice prepíšu do integrálnej formy, ktorá sa následne diskretizuje a prevedie na sústavu algebraických rovníc vhodnú pre numerické riešenie na počítači.

1.4 Súčasný stav a výzvy

Modelovanie PEMFC zohráva dôležitú úlohu pri vývoji nízkoemisných energetických systémov. Hoci simulácie podporujú návrh a optimalizáciu v tejto rozvíjajúcej sa oblasti, viaceré výzvy pretrvávajú [11].

Hlavné problémy zahŕňajú nepresné modelovanie poklesu napätia pri vysokých prúdových hustotách [12, 13], absenciu systematického porovnávania so experimentálnymi dátami [14] a nedostatočné diagnostické analýzy výkonnosti pomocou CFD [11, 15, 16]. Väčšina výskumu sa sústreďuje na štandardné PEMFC, s menším záujmom o reverzibilné články [17, 18].

Významnou príležitosťou je aplikácia umelej inteligencie na zrýchlenie simulácií a automatizáciu porovnávania dát [11, 19]. Rastie aj trend digitálnych dvojčiat, ktoré integrujú simulácie s fyzickými systémami pre Priemysel 4.0 [20–23].

Zdokonaľovanie modelov a simulácií PEMFC je nevyhnutné. CFD simulácie umožňujú optimalizáciu geometrie, materiálov a distribúcie reaktantov, čo je kľúčové pre výkon a životnosť. Budúcnosť smeruje ku kombinácii systémových a CFD simulácií pre tvorbu digitálnych dvojčiat. Na to je však nevyhnutné najskôr dokončiť proces vývoja CFD simulačných nástrojov pre oblasť PEMFC, aby sa jasne a spoľahlivo dosahovali relevantné výsledky, k čomu má prispieť aj táto práca.

2 Realizácia práce

Táto kapitola dokumentuje praktickú časť práce, ktorá aplikuje teoretické poznatky na rozvoj metodík CFD simulácií PEMFC, teda splnenie výskumných cieľov.

2.1 Definovanie cieľov dizertačnej práce

Efektívne stanovenie cieľov dizertačnej práce vyžaduje pochopenie komplexnosti CFD simulácií PEMFC, ktoré sú náročnejšie než konvenčné CFD simulácie. Začiatocníci musia ovládať princípy PEMFC, ich komponenty, termodynamiku, elektrochémiu a transport látok, ako aj proces na pozadí CFD pre spoľahlivé výsledky. Vzhľadom na vzájomné prepojenie fyzikálnych domén sú CFD simulácie PEMFC mimoriadne citlivé, pričom správna tvorba siete a aktivovanie dejov v správnom poradí sú kritické.

Na základe týchto úvah sú ako prínosy definované štyri hlavné ciele:

1. Vytvorenie metodiky tvorby výpočtovej siete.
2. Vytvorenie metodiky simulovania kľúčových dejov.
3. Analýza vplyvu modelových rovníc na kvalitu výsledkov.
4. Overenie funkčnosti prvej a druhej metodiky simuláciou nového, vlastne navrhnutého plynového kanálika.

Tieto hlavné ciele budú sprevádzané čiastkovými cieľmi:

- Citlivostná analýza hustoty prvkov.
- Analýza iného typu zaužívaného plynového kanálika.
- Návrh a analýza vlastného typu plynového kanálika (tento cieľ slúži iba na overenie univerzálnosti navrhnutých metodík).

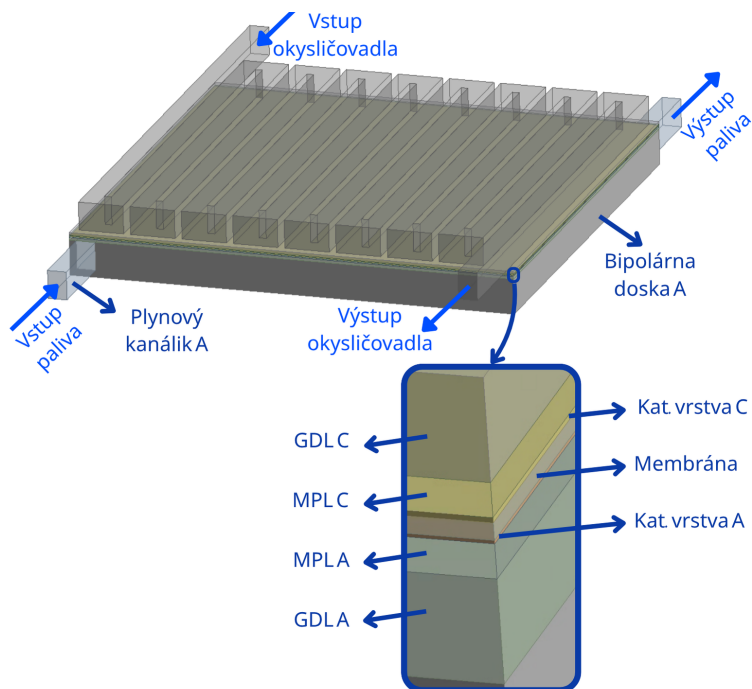
Táto práca prispieva k zvládnutiu a rozvoju CFD simulácií PEMFC univerzálnym postupom pre rôzne geometrie kanálikov a novým prístupom k analýze vplyvu modelových dejov. Simulácie boli vykonané v programe ANSYS 2025 R1, na hardvéri:

- Procesor: Intel(R) Core(TM) i7-4820K CPU @ 3.70 GHz
- Operačná pamäť (RAM): 48 GB
- Typ systému: 64-bitový operačný systém, procesor typu x64

2.2 Metodika tvorby výpočtovej siete

Geometria bola vytvorená v ANSYS Design Modeler a sieť v ICEM CFD, ktorý umožňuje detailnú kontrolu a tvorbu presných štruktúrovaných hexahedrálnych sietí vhodných pre PEMFC. Sieťovanie prebieha hierarchicky (geometria–bloky–sieť) a vyžaduje realistické proporcie, samostatné telesá, pomenovanie, zdieľanú topológiu a správne okrajové podmienky. Obr. 3 zobrazuje finálny model s predĺženými vstupmi,

výstupmi a vrstvami. Rozmery (v mm): šírka a dĺžka PEMFC (50,6), výška (8,9), šírka kanáliku (2,15), dĺžka vstupov (10).



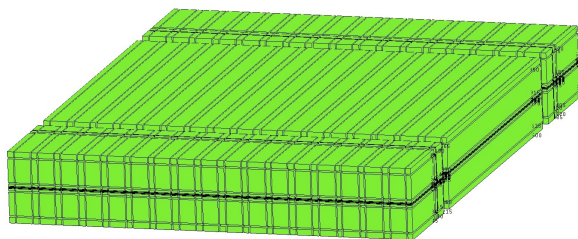
Obr. 3: Základná geometria modelu PEMFC s odkrytou BPP C

Kvalita výpočtovej siete zásadne ovplyvňuje presnosť, stabilitu a čas simulácie. Medzi hlavné ukazovatele patrí skosenie (odchýlka prvku od ideálu, ideálne 0), jakobián (deformácia prvku, záporné hodnoty sú nestabilné), ortogonalita (ideálne 1, problém pri hodnote blízkej 0 – dôležitá pri MKO) a pomer strán (čím nižší, tým lepšie - vyšší je prípustný len pri dobrej ortogonalite a plynulosti siete).

Skúsenosti ukázali, že ortogonalita je pri PEMFC kľúčová, najmä pri zakrivených geometriách, kde pomáha funkcia O-grid. Aj pri vyššom pomere strán zostáva sieť stabilná, ak je ortogonalita kvalitná. Preto bola tvorba siete zameraná na jej maximalizáciu, čo sa ukázalo ako zásadné pre presnosť a konvergenciu simulácií.

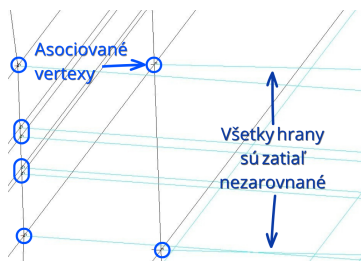
Metodika tvorby siete:

1. Rozdelenie prvotného bloku: Prvotný blok sa rozdelí na menšie podľa jednotlivých komponentov PEMFC modelu (Obr. 4).



Obr. 4: Rozdelenie prvotného bloku na menšie podľa komponentov

2. Asociácia 0D prvkov: Pomocou funkcie associate sa priradia vertexy blokov k priestorovým polohám bodov (Obr. 5).



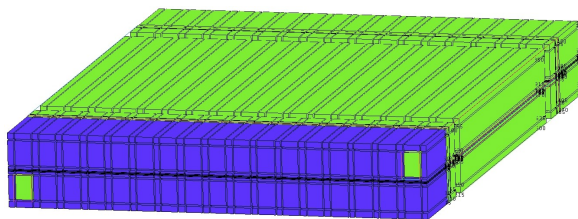
Obr. 5: Asociácia vertexov blokov s bodmi geometrie, detail MEA

3. Zarovnanie hrán: Pomocou funkcie align vertices sa hrany rozdelených blokov zarovnávajú do rovín (Obr. 6).

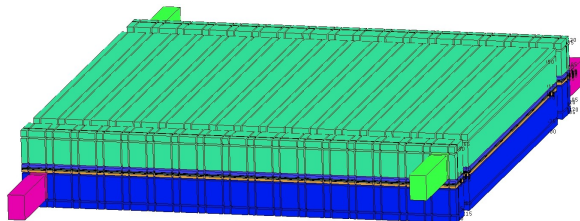


Obr. 6: Zarovnanie hrán podľa napoložovaných vertex-ov, detail MEA

4. Odstránenie nadbytočných blokov: Systém môže obsahovať nadbytočné bloky (napr. pri predĺžených kanáloch, Obr. 7).
5. Priradenie blokov ku geom. partom: Pre správnu identifikáciu oblastí v CFD softvéri je kľúčové priradiť bloky k zodpovedajúcim geometrickým partom PEMFC (Obr. 8).

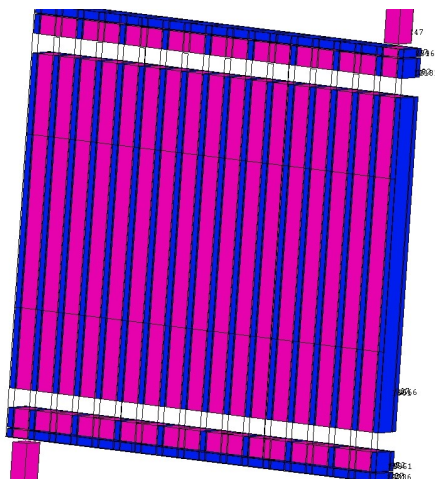


Obr. 7: Nadbytočné bloky na odstránenie pred generovaním siete



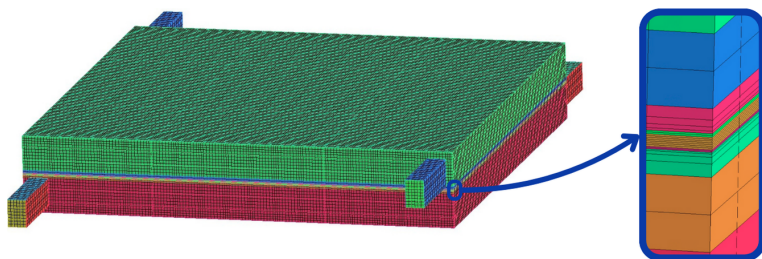
Obr. 8: Priradenie blokov k definovaným geometrickým partom

6. Asociácia ostatných prvkov: Asociácia všetkých prvkov nie je vždy nutné, ale asociácia plôch kanálikov, BPP a GDL je (Obr. 9).



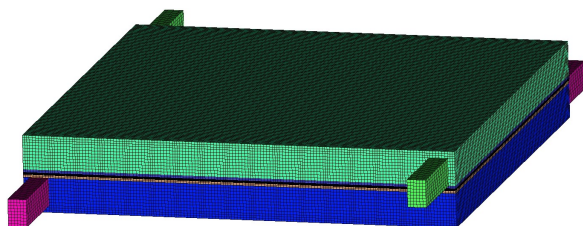
Obr. 9: Detail rozhraní medzi plynovým kanálikom, GDL a BPP

7. Predpríprava siete (pre-mesh): Pre-mesh bude transformovaný na finálnu sieť. Táto fáza zahŕňa sieťovanie blokov s detailnou kontrolou (Obr. 10).



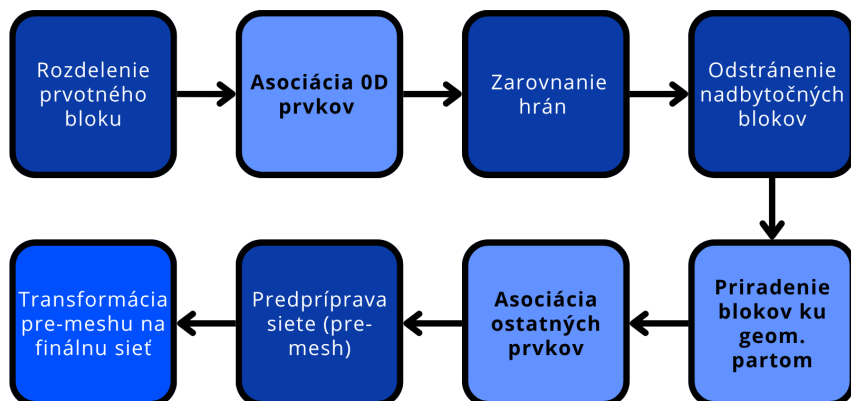
Obr. 10: Ukážka pre-meshu jednotlivých blokov aj s detailom

8. Transformácia pre-meshu na finálnu sieť: Finálnym krokom je transformácia pre-meshu na výslednú sieť (viď Obr. 11). Po dokončení sa vykoná kontrola priradenia konečných objemov a kvality siete, následne export do Fluentu.



Obr. 11: Finálna sieť modelu PEMFC pre export do Fluentu

Navrhnutá metodika predstavuje spoľahlivý a systematický prístup k tvorbe kvalitnej výpočtovej siete pre CFD simulácie PEMFC. Slúži ako jeden z hlavných výstupov práce. Metodika je zhrnutá na Obr. 12.



Obr. 12: Zosumarizovaný proces tvorby výpočtovej siete

2.3 Metodika simulovania kľúčových dejov

Druhou a pravdepodobne najväčšou výzvou pre nových záujemcov o problematiku CFD simulácií PEMFC je dosiahnutie konvergovaného stavu riešenia, ktorý by vierohodne zachytával deje v PEMFC.

2.3.1 Referenčný prevádzkový stav PEMFC

Referenčný stav PEMFC v tejto práci predstavuje model so aktivovanými všetkými dôležitými rovnicami okrem prechodu dusíka a anizotropnej vodivosti v GD-L/MPL, ktorých vplyv je zanedbateľný. Použité sú štandardné materiálové vlastnosti z knižnice PEMFC modulu. Nižšie sú uvedené rovnice a ich skratky pre lepšiu orientáciu v texte:

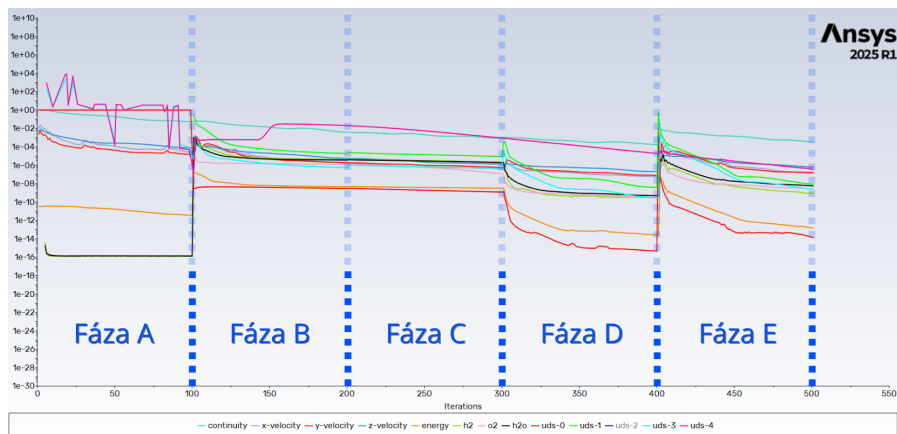
- Jouleovo teplo (Joule heating), **JH**
- Reakčný ohrev (Reaction heating), **RH**
- Elektrochemické zdroje (Electrochemistry sources), **ES**
- Tepelne závislá referenčná výmenná prúdová hustota (Temperature Dependent Jref), **TDJ**
- Viaczložková difúzia (Multicomponent Diffusion), **MD**
- Kvapalná fáza (Liquid Phase), **LP**
- Výpočet kvapaliny v kanáloch (Compute Liquid in Channels), **CLIC**
- Použitie polčlánkových potenciálov (Use Half-Cell Potentials), **UHP**
- Katódový časticový model (Cathode Particle Model), **CPM**
- Rýchlosť Butler-Volmerovej rovnice (Butler-Volmer Rate), **BVR**
- Zahrnutie dynamického tlaku (Include Dynamic Head), **IDH**
- Knudsenova difúzia (Knudsen Diffusion), **KD**
- Efektívna protónová vodivosť v MEA (Effective P-Cond. in MEA), **EPC**
- Prechod dusíka (N_2 Crossover), **NC**
- Anizotropná elektrická vodivosť v GDL/MPL (Anisotropic E-Cond. in GD-L/MPL), **AEGM**

2.3.2 Problematika konvergenzie riešenia

Simulácia PEMFC je náročná pre súbeh transportných, termodynamických a elektrochemických javov. Stabilná konvergenca si vyžaduje správne poradie aktivácie rovníc a vhodné podrelaxačné faktory (URF). Odporúča sa $URF = 1$ pre hlavné veličiny (vodík, kyslík, voda, energia, elektrický a protónový potenciál). Táto práca ponúka aktuálnejší a efektívnejší postup konvergenzie oproti literatúre. Hoci bez

experimentu, výsledky boli overené porovnaním polarizačných kriviek s publikovanými dátami [24–29].

Numerická konvergenca bola sledovaná cez rezíduá, ktoré umožňujú kontrolované aktivovanie rovníc pre stabilné riešenie. Všetky simulácie boli monitorované ich vývojom, pričom divergencia (nárast/kolísanie) signalizovala potrebu úpravy siete alebo okrajových podmienok. Obr. 13 ilustruje päťfázový prístup, ktorý tvorí základ tejto práce a je plne reprodukovateľný.



Obr. 13: Konvergentný priebeh – zvyšovanie URF a aktivovanie rovníc

Fázy postupu sú:

- Fáza A – Riešenie len rovníc prúdenia (pri 1 V) pre stabilizáciu transportného poľa.
- Fáza B – Aktivovanie modelových rovníc (napr. transport vodíka, elektrické potenciály) s URF 0,9 pre zníženie výpočtovej komplikovanosti.
- Fáza C – Zvýšenie URF na 0,95 pre rýchlejšiu konvergenziu.
- Fáza D – Nastavenie URF na 1 pre maximálnu presnosť.
- Fáza E – Zníženie napätia na 0,9 V pre získanie novej prevádzkovej charakteristiky PEMFC.

V module PEMFC v ANSYS Fluent sa UDS používajú na výpočet doplnkových veličín: protónový potenciál (UDS-1), kapilárny tlak (UDS-2), obsah vody v membráne (UDS-3) a koncentrácia kvapalnej vody v kanáloch (UDS-4). UDS-2 sa často nezobrazuje pre svoje nízke hodnoty a numerické fluktuácie. Stabilita simulácie sa sledovala pomocou rezíduí, tlakového profilu v kanálikoch a teploty v MEA. Konvergenca hlavných rezíduí naznačuje aj stabilitu týchto veličín.

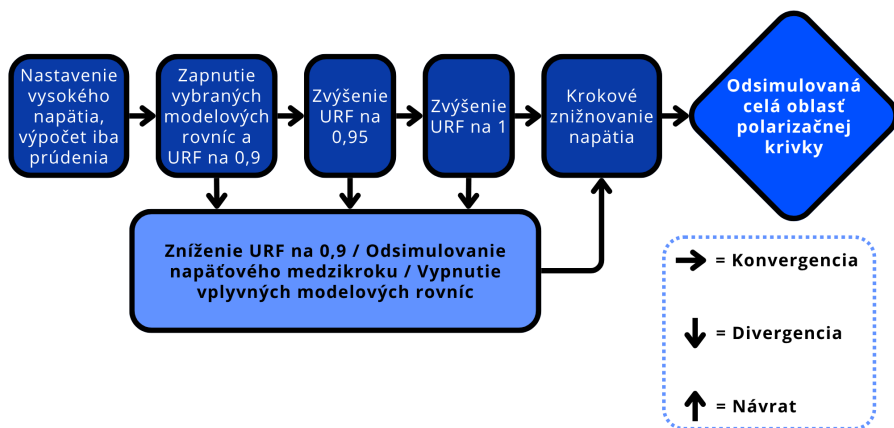
2.3.3 Návrh metodiky simulovania kľúčových dejov

Navrhovaná metodika v tejto práci sa snaží vytipovať najrýchlejší a najjednoduchší postup pre konvergenciu referenčného stavu PEMFC. Je založená na testovaní a osvedčených postupoch na nápravu divergencie, čím šetrí čas pri stabilnom výpočte a zároveň poskytuje rozsiahle tipy na riešenie problémov. Počty iterácií sú orientačné, pretože závisia od špecifik modelu a odkazujú sa na fázy konvergenzie z Obr. 13.

V spísanej podobe možno kroky metodiky vidieť nasledovne:

1. Nastavte napätie PEMFC na vysokú hodnotu (napr. 1 V) a deaktivujte celý modul PEMFC. Spustite iba základné rovnice prúdenia, približne na 100 iterácií (Fáza A).
 2. Aktivujte ľubovoľné modelové rovnice, no znížte spoločné URF na hodnotu 0,9, približne na 100 iterácií (Fáza B).
 3. Pri tých istých aktivovaných rovniciach prejdite na hodnotu URF 0,95, približne na 100 iterácií (Fáza C).
 4. Pri tých istých aktivovaných rovniciach prejdite na hodnotu URF 1 a pokračujte vo výpočte na viac ako 100 iterácií, kým sa nedosiahne konvergencia (Fáza D).
 5. S malým krokom (napr. 0,1 V) postupne znižujte napätie, pričom URF zostáva nastavené na 1, aby sa pokryla celá polarizačná krivka. Pre každý krok napätia vykonajte aspoň 100 iterácií (Fáza E).
- Tip na nápravu divergencie: Ak dôjde k divergencii, skúste simulovať dané napätie opäť s nižším URF, častokrát stačí URF 0,98, ak nie prejdite na ešte nižšie URF, a postupne ho zvyšujte na 1. Prípadne odsimulujte medzikrok napätia (napríklad znížte iba o 0,05 V). Ak ani tieto prístupy nepomôžu, je potrebné deaktivovať rovnice, ktoré z pohľadu výpočtovej náročnosti silne ovplyvňujú konvergenciu, napr. niektoré z rovníc: JH, RH, ES, LP, CLIC, IDH. V prípade pretrvávajúcej divergencie môžete vypnúť aj iné rovnice, prípadne tento prístup skombinovať so skokovým znížením a postupným navyšovaním URF.

Hlavným výstupom tejto podkapitoly, a teda splnením jedného z nosných cieľov práce, je metodika, ktorá bola vyššie popísaná a ktorá je spracovaná vo forme vývojového diagramu na Obr. 14, ako býva zvykom aj pri iných prácach skúmajúcich metodiky simulovania PEMFC [29–32].

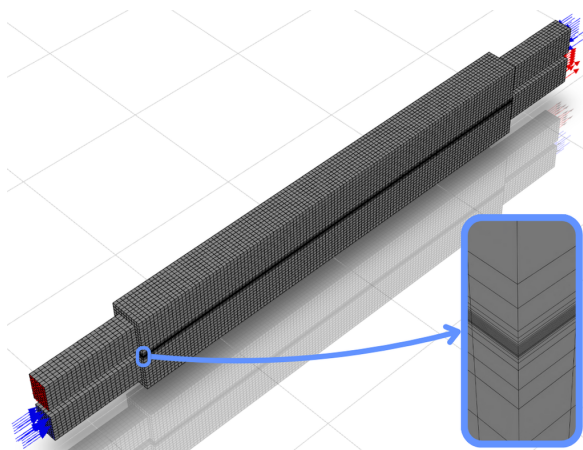


Obr. 14: Vývojový diagram metodiky simulovania dejov v PEMFC

2.4 Citlivostná analýza hustoty prvkov v modeli

Citlivostná analýza hustoty prvkov hľadá kompromis medzi kvalitou siete a výpočtovou náročnosťou pre spoľahlivé výsledky s minimálnym časom. Testovaný bol zjednodušený PEMFC model s priamym kanálikom.

Najlepšia sieť mala 8 prvkov po výške membrány a 3 po katalytických vrstvách, celkovo 91 204 prvkov a 67 612 uzlov, s výpočtom za 1:05 minút a max. pomerom strán 114,367, čo sa ukázalo ako spoľahlivé. Výsledná sieť (obr. 15) slúži ako základ pre celý PEMFC model.



Obr. 15: Zobrazenie základu siete použitej pre simulácie celého modelu

2.5 Analýza vplyvu modelových rovníc na kvalitu výsledkov

Táto časť aplikuje predchádzajúce metodiky na analýzu prípadových štúdií serpentínového PEMFC so zohľadnením vplyvu rôznych modelových rovníc. Referenčná štúdia „ALL“ obsahuje všetky rovnice okrem NC a AEGM, ostatné prípadové štúdie vynechávajú vybrané rovnice, pričom ostatné referenčné zostávajú aktívne.

Simulácie prebiehali v ANSYS Fluent v režime 3DDP (trojrozmerný model s dvojitou presnosťou) s 6 CPU jadrami, v ustálenom stave, s laminárnym modelom prúdenia, Species Transport Modelom (transport zmesí plynov), riešením rovnice energie a jednoduchým Pressure-Velocity Coupling (SIMPLE) pre prepojenie tlaku a rýchlosti. Diskretizácia bola First Order Upwind. Podmienky sú uvedené v Tab. 1.

Tabuľka 1: Prevádzkové a počiatočné podmienky pre simulácie PEMFC

Parameter	Hodnota
Referenčná prúdová hustota	1,5 A/cm ²
Referenčná plocha membrány	25,6 cm ²
Anódová relatívna vlhkosť	40 %
Katódová relatívna vlhkosť	45 %
Anódový/Katódový/Operačný tlak	175000 Pa
Anódová stechiometria H ₂	2
Katóda stechiometria O ₂	3
Teplota steny A a C terminálu	70 °C (343,15 K)
Anódový hmotnostný tok	1,3443e-06 kg/s
Anódový hmotnostný zlomok H ₂	0,6
Anódový hmotnostný zlomok H ₂ O	0,4
Katódový hmotnostný tok na vstupe	4,3211e-05 kg/s
Katódový hmotnostný zlomok H ₂ O	0,05
Katódový hmotnostný zlomok O ₂	0,22
Anódový/katódový výstup	Atmosférický tlak

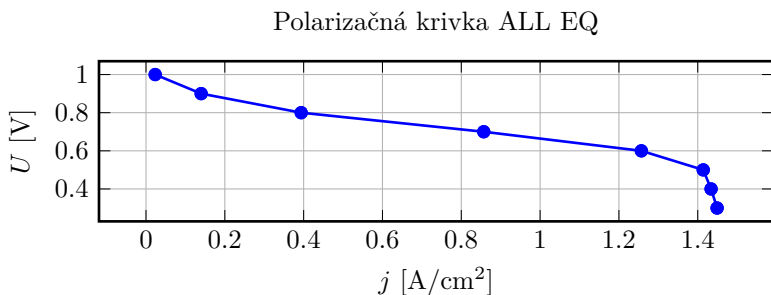
Pre porovnateľnosť simulácií sa používajú rovnaké podmienky a štandardná inicializácia s teplotou podľa okrajov. Geometria serpentínových kanálikov má sieť s 1 157 216 prvkami a 887 592 uzlami, vrátane 8 prvkov cez membránu a 3 v katalytických vrstvách, max. pomer strán dosahuje 127.

2.5.1 Vplyv všetkých rovníc (referenčný stav)

Tabuľka 2 sumarizuje výsledky referenčného stavu, kde pokles napätia U z 1 V na 0,3 V vedie k nárastu prúdovej hustoty j , v súlade s očakávaním. Prakticky zhodné hodnoty anódovej (j_A) a katódovej (j_C) prúdovej hustoty potvrdzujú numerickú stabilitu a vyrovnaný elektrochemický chod, s rastúcim počtom iterácií pri nižších napätiach. Výsledky vykazujú fyzikálnu konzistenciu a stabilitu modelu, verného prevádzke reálneho PEMFC, čo je graficky znázornené na Obr. 16.

Tabuľka 2: ALL EQ

U [V]	j_A [A/cm ²]	j_C [A/cm ²]	j [A/cm ²]	Iterácie [-]
1,0	0,023289	0,023289	0,023289	100
0,9	0,13994	0,13994	0,13994	100
0,8	0,393702	0,393861	0,3937815	100
0,7	0,85699	0,856902	0,856946	150
0,6	1,257094	1,256801	1,2569475	100
0,5	1,412702	1,415138	1,41392	300
0,4	1,426339	1,441395	1,433867	200
0,3	1,433268	1,464966	1,449117	200



Obr. 16: Polarizačná krivka referenčného stavu

Tabuľky 3, 4 a 5 uvádzajú hodnoty vybraných fyzikálnych veličín.

Priemerná absolútna hodnota prúdovej hustoty stúpa s klesajúcim napätím, čo je dôsledkom vyššej elektrickej záťaže. Z hodnoty približne 253 A/m² pri 1 V stúpne na 9327 A/m² pri 0,7 V a dosiahne až 23 703 A/m² pri 0,4 V. Tento vývoj odzrkadľuje bežnú prevádzku PEMFC. Článok pracuje efektívnejšie z pohľadu výstupného výkonu, no zároveň narastajú aj straty a teplotné zaťaženie.

Tabuľka 3: ALL EQ, 1 V

Oblasť	Abs. hodnota j [A/m ²]	Statická teplota [K]	Reakčný zdroj [W/m ³]	Ohmický zdroj [W/m ³]	Statický tlak [Pa]	Hmot. zlomok vody [-]	Hmot. zlomok vodíka [-]	Hmot. zlomok kyslíka [-]	El.-chem. prepätie [V]
Kat. A	113,8715	343,1552	70421,762	7844,512	18,646	0,413	0,587	0	0,003
Kat. C	116,053	343,156	7491035,8	7723,672	328,636	0,0509	0	0,218	-0,192
Kanáľ A	3,91E-24	343,154	0	0	18,448	0,41	0,59	0	0
Kanáľ C	3,88E-24	343,153	0	0	328,0394	0,0502	0	0,219	0
GDL A	428,128	343,153	0	46,919	18,548	0,412	0,588	0	0
GDL C	425,902	343,153	0	46,537	328,658	0,0506	0	0,219	0
MPL A	371,299	343,155	0	29,364	18,62	0,413	0,587	0	0
MPL C	368,703	343,156	0	29,443	328,643	0,0507	0	0,219	0
BPP A	554,396	343,151	0	0,408	0	0	0	0	0
BPP C	554,394	343,151	0	0,408	0	0	0	0	0
Mem.	232,893	343,166	0	25356,49	0	0	0	0	0
Priemer	253,216	343,154	12587,705	166,7145	105,289	0,139	0,178	0,066	-0,0003

Tabuľka 4: ALL EQ, 0,7 V

Oblasť	Abs. hodnota j [A/m ²]	Statická teplota [K]	Reakčný zdroj [W/m ³]	Ohmický zdroj [W/m ³]	Statický tlak [Pa]	Hmot. zlomok vody [-]	Hmot. zlomok vodíka [-]	Hmot. zlomok kyslíka [-]	El.-chem. prepätie [V]
Kat. A	4130,898	344,316	54157823	4744707,6	19,239	0,576	0,423	0	0,0626
Kat. C	4194,81	344,385	3,56E+08	2754497	330,132	0,119	0	0,127	-0,331
Kanáľ A	1,45E-22	343,512	0	0	17,649	0,542	0,458	0	0
Kanáľ C	1,44E-22	343,545	0	0	330,151	0,067	0	0,198	0
GDL A	15789,699	344,197	0	64396,77	18,451	0,566	0,433	0	0
GDL C	15723,255	344,239	0	63396,401	330,487	0,096	0	0,136	0
MPL A	13686,07	344,297	0	40887,725	18,922	0,575	0,424	0	0
MPL C	13608,251	344,345	0	40440,226	330,291	0,111	0	0,138	0
BPP A	20421,746	343,247	0	569,903	0	0	0	0	0
BPP C	20421,818	343,248	0	560,025	0	0	0	0	0
Mem.	8570,499	344,342	0	12198917	0	0	0	0	0
Priemer	9326,699	343,490	653949,98	83264,943	105,708	0,187	0,137	0,058	-0,0005

Tabuľka 5: ALL EQ, 0,4 V

Oblasť	Abs. hodnota j [A/m ²]	Statická teplota [K]	Reakčný zdroj [W/m ³]	Ohmický zdroj [W/m ³]	Statický tlak [Pa]	Hmot. zlomok vody [-]	Hmot. zlomok vodíka [-]	Hmot. zlomok kyslíka [-]	El.-chem. prepätie [V]
Kat. A	6779,602	346,400	1,15E+08	11943119	14,949	0,626	0,374	0	0,079
Kat. C	7311,734	346,521	8,24E+08	5658093	329,538	0,154	0	0,170	-0,576
Kanáľ A	2,57E-22	344,162	0	0	15,167	0,590	0,409	0	0
Kanáľ C	4,32E-22	344,237	0	0	330,68	0,081	0	0,183	0
GDL A	27614,139	346,089	0	197551,04	14,819	0,615	0,384	0	0
GDL C	50508,894	346,174	0	723515,79	330,605	0,122	0	0,171	0
MPL A	24393,586	346,351	0	102945,09	14,903	0,622	0,376	0	0
MPL C	43703,279	346,468	0	474734,52	329,97	0,141	0	0,18	0
BPP A	34025,029	343,411	0	1590,171	0	0	0	0	0
BPP C	71455,439	343,419	0	6892,363	0	0	0	0	0
Mem.	14292,939	346,455	0	27091495	0	0	0	0	0
Priemer	23703,372	344,099	1503977,5	213054,63	105,034	0,206	0,122	0,052	-0,001

Statická teplota mierne rastie s narastajúcim prúdom, pričom sa z hodnoty 343,15 K pri 1 V zvyšuje na 343,49 K pri 0,7 V a dosahuje 344,1 K pri 0,4 V. Tento nárast je dôsledkom vyššej produkcie tepla vo vnútri článku, najmä v katalytických vrstvách a membráne. Teplota má vplyv napr. na rýchlosť reakcií či vodivosť membrány.

Reakčný zdroj tepla, ktorý reprezentuje množstvo tepla vzniknutého v dôsledku elektrochemických reakcií, narastá výrazne pri zvyšovaní sa prúde. Pri napätí 1

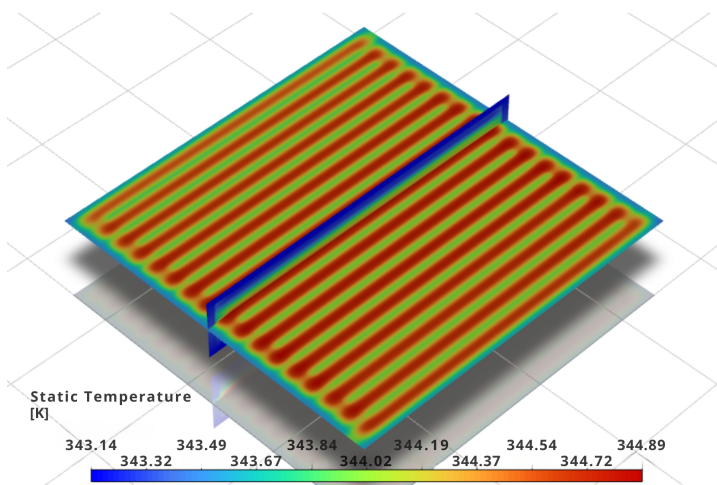
V je jeho priemerná hodnota približne $12\,567\text{ W/m}^3$, no pri $0,7\text{ V}$ už dosahuje $653\,950\text{ W/m}^3$ a pri $0,4\text{ V}$ až $1\,503\,977\text{ W/m}^3$. Tento prudký nárast koreluje s vyššou intenzitou reakcií pri väčšej záťaži, čím sa zvyšuje aj množstvo generovaného tepla.

Podobne aj ohmický zdroj tepla, ktorý súvisí s odporom vodivých častí, narastá s rastúcou prúdovou hustotou. Pri 1 V je na úrovni $166,71\text{ W/m}^3$, pri $0,7\text{ V}$ dosahuje $83\,265\text{ W/m}^3$ a pri $0,4\text{ V}$ až $213\,054\text{ W/m}^3$. Tento nárast je spôsobený najmä zvyšujúcim sa napäťovým úbytkom na membráne a elektródach pri vyššom prúde.

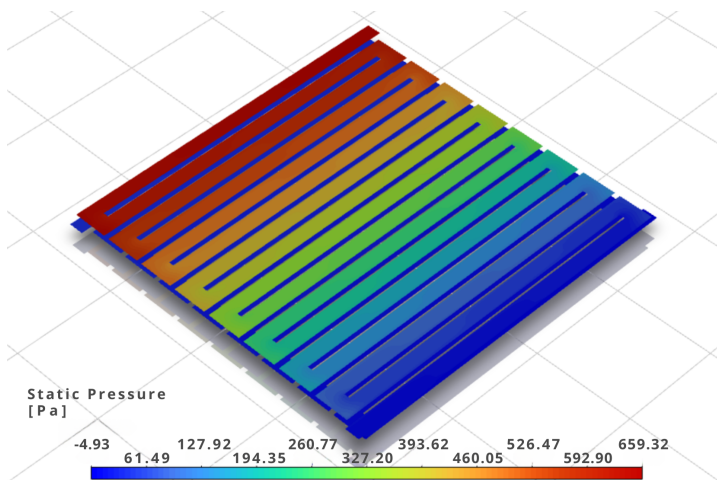
Statický tlak zostáva vo všetkých prípadoch relatívne konštantný, s miernym poklesom pri vyššom prúde. Pri 1 V je priemerná hodnota $105,29\text{ Pa}$, pri $0,7\text{ V}$ stúpa na $105,7\text{ Pa}$ a pri $0,4\text{ V}$ klesá na 105 Pa . Tento pokles súvisí s vyššou spotrebou reaktantov a prúdením plynov, no ide o zanedbateľný rozdiel z hľadiska funkcie, keďže je cez okrajové podmienky predpísaná rovnaká hodnota.

So znižujúcim sa napätím rastie hmotnostný zlomok vody (z $0,14$ pri 1 V na $0,2$ pri $0,4\text{ V}$), čo naznačuje zvýšenú tvorbu a slabšie odstraňovanie vody. Naopak, hmotnostné zlomky vodíka (z $0,178$ na $0,123$) a kyslíka (z $0,07$ na $0,052$) klesajú v dôsledku vyššej spotreby reaktantov pri intenzívnejšej reakcii a nižšom napätí.

V PEMFC simuláciách je súčet anodického a katódového elektrochemického prepätia blízky nule, keďže ich hodnoty sú približne rovnaké, no s opačným znamienkom. Napriek tomu majú tieto jednotlivé prepätia zásadný vplyv na lokálne reakčné podmienky a celkovú účinnosť článku. Najzaujímavejšie hodnoty z analýz vyššie sú vyobrazené pri $0,7\text{ V}$, na Obr. 17 a 18, kde sa tieto tvrdenia potvrdzujú.



Obr. 17: Priestorové rozloženie teploty, serpentínové kanáliky

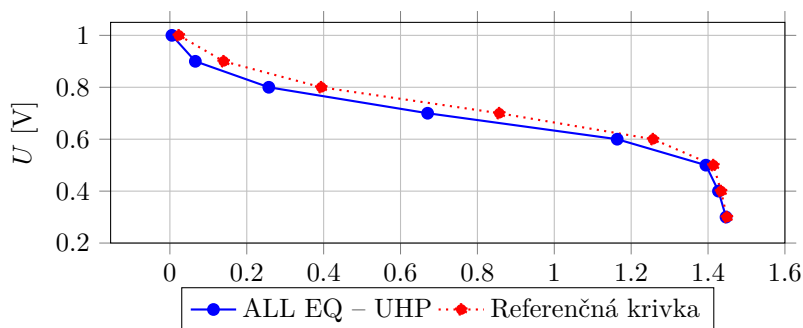


Obr. 18: Priestorové rozloženie tlaku, serpentínové kanáliky

2.5.2 Prípadové štúdie

Vplyv použitia polčlánkových potenciálov (UHP)

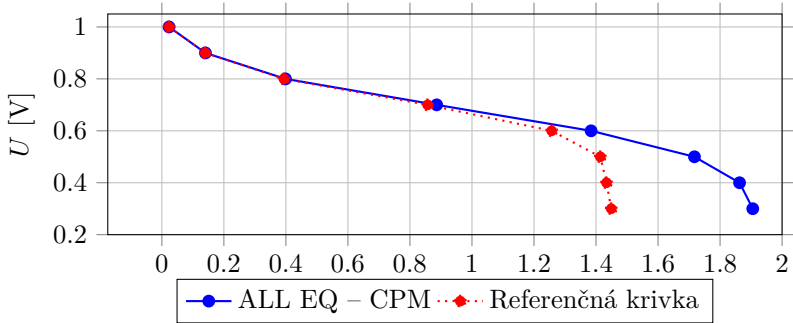
Vypnutie rovnice UHP, ktorá popisuje vplyv reaktantov a produktov na polčlánkové potenciály, vedie k skresleniu polarizačnej krivky (Obr. 19). Zanedbanie UHP spôsobuje nižšie hustoty prúdu, najmä v aktivačnej a ohmickej oblasti, kde rozdiel presahuje 100 %. To naznačuje, že UHP je kľúčové pre zachytenie týchto prevádzkových oblastí.



Obr. 19: Porovnanie pol. kriviek: ALL EQ – UHP a referenčná krivka

Vplyv katódového časticového modelu (CPM)

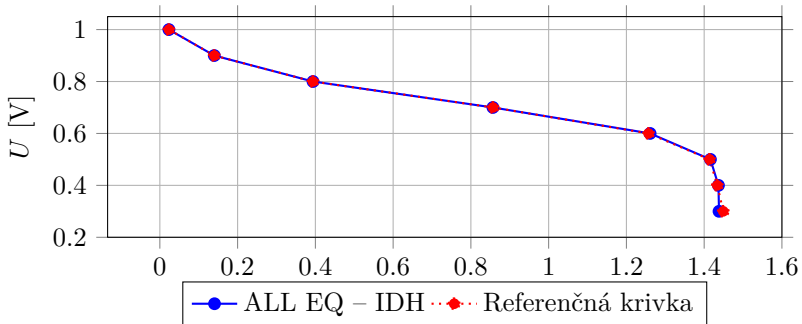
Katódový časticový model (CPM) zohľadňuje odpor prenosu hmoty v mikroštruktúre katalytických vrstiev. Ako ukazuje Obr. 20, jeho vplyv je kľúčový, lebo sa bez neho výrazne skresľujú výsledky pri prechode do oblasti koncentračných strát, čím je modelovanie obmedzené iba na vysoké napätia.



Obr. 20: Porovnanie pol. kriviek: ALL EQ – CPM a referenčná krivka

Vplyv zahrnutia dynamického tlaku (IDH)

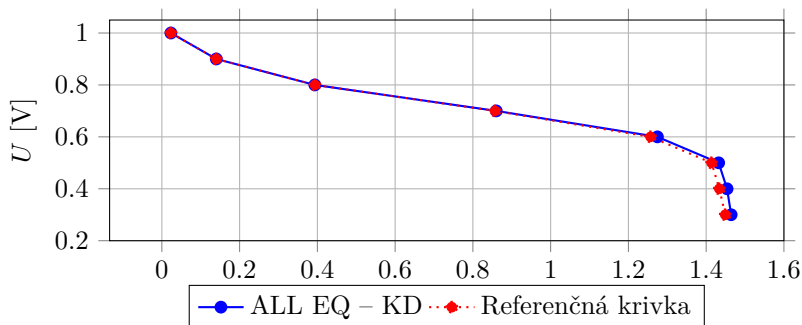
Hoci teória naznačuje vplyv dynamického tlaku na prúdenie, polarizačná krivka na Obr. 21 ukazuje, že jeho zanedbanie má pri malých PEMFC minimálny vplyv, čo naznačuje možnosť jeho vypnutia pre zjednodušenie simulácií.



Obr. 21: Porovnanie pol. kriviek: ALL EQ – IDH a referenčná krivka

Vplyv Knudsenovej difúzie (KD)

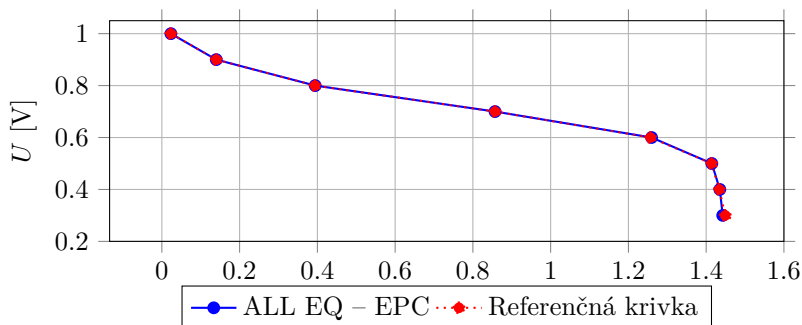
Knudsenova difúzia je dôležitá z teoretického hľadiska, keď je stredná voľná dráha molekúl väčšia ako priemer pórov. Avšak, ako Obr. 22 demonštruje, pre malé PEMFC so štandardnými pórovitosťami je jej vplyv zanedbateľný.



Obr. 22: Porovnanie pol. kriviek: ALL EQ – KD a referenčná krivka

Vplyv efektívnej protónovej vodivosti v MEA (EPC)

Teória zdôrazňuje, že efektívna protónová vodivosť v MEA je kľúčová pre transport protónov a ovplyvňuje ohmické straty. Ak sa zanedbá, ako ukazuje Obr. 23, polarizačná krivka sa takmer nelíši od referenčného stavu. Pri menších PEMFC je teda možné túto rovnicu zanedbať a počítať so zjednodušenými predpokladmi tortuozity a prenosu.



Obr. 23: Porovnanie pol. kriviek: ALL EQ – EPC a referenčná krivka

Vplyv rýchlosti Butler-Volmerovej rovnice (BVR)

Vypnutie Butler-Volmerovej rovnice (rozšírenie Tafelovej rovnice) znemožňuje konvergenciu výpočtov v PEMFC CFD simuláciách dokonca aj pri 1 V, čo je najstabilnejší stav. Preto neboli získané žiadne výsledky okrem zistenia, že ide o esenciálnu rovnicu pre stabilitu simulácií.

2.5.3 Zhodnotenie vplyvu modelových rovníc

Komplexná analýza modelových rovníc pre PEMFC CFD simulácie potvrdila, že referenčný model replikuje správanie reálneho PEMFC. Pre kvalitné výsledky je kľúčové zahrnúť:

- Vplyv polčlánkových potenciálov (UHP), pre presné modelovanie aktivačnej a ohmickej oblasti.
- Vplyv katódového časticového modelu (CPM), pre korektný prenos hmoty v katalytických vrstvách pri vysokých prúdových hustotách.
- Butler-Volmerovu rovnicu (BVR), ako esenciálnu pre stabilitu.

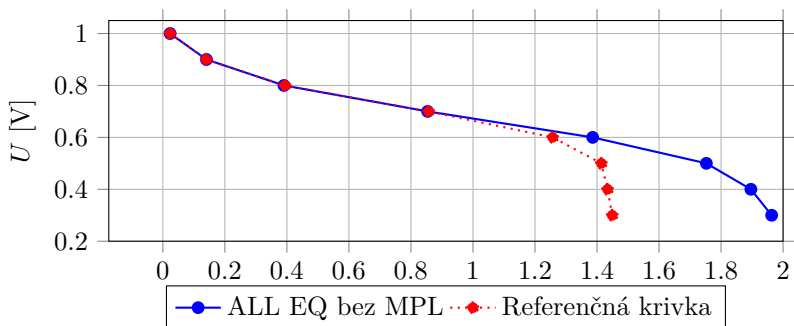
Pri menších PEMFC je možné s opatrnosťou zanedbať vplyv:

- Zahrnutie dynamického tlaku (IDH), kvôli malým tlakovým zmenám.
- Knudsenovej difúzie (KD), ak sú uvažované štandardné póry.
- Efektívnej protónovej vodivosti v MEA (EPC), keďže jej zjednodušenie má minimálny dopad na výsledky.

2.6 Vplyv geometrických konfigurácií PEMFC

Vplyv mikroporéznej vrstvy

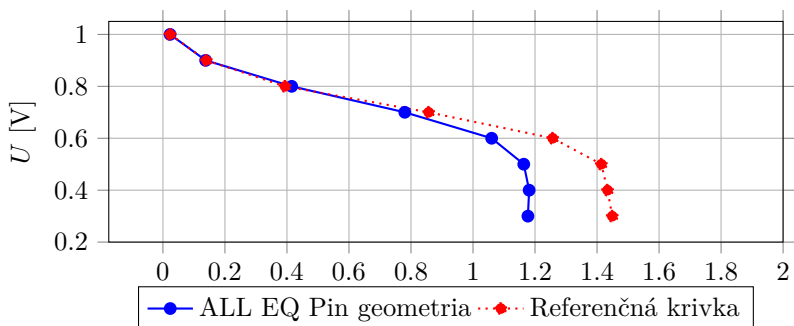
Prvá štúdia analyzuje PEMFC bez MPL vrstvy. Upravená geometria je totožná s referenčnou, iba má odobratú MPL vrstvu. Sieť má taktiež rovnaký charakter. Po teoretickej stránke, vynechanie MPL vrstvy má viesť k nepresnému modelovaniu distribúcie vody, plynov a prúdu. Ako ukazuje Obr. 24, absencia MPL spôsobuje výrazné rozdiely v polarizačnej krivke, najmä v oblasti koncentračných strát. Zahrnutie MPL je kľúčové pre presné simulácie pri stredných a vysokých prúdových hustotách, hoci jej vynechanie znižuje výpočtovú náročnosť, no na úkor fyzikálnej presnosti.



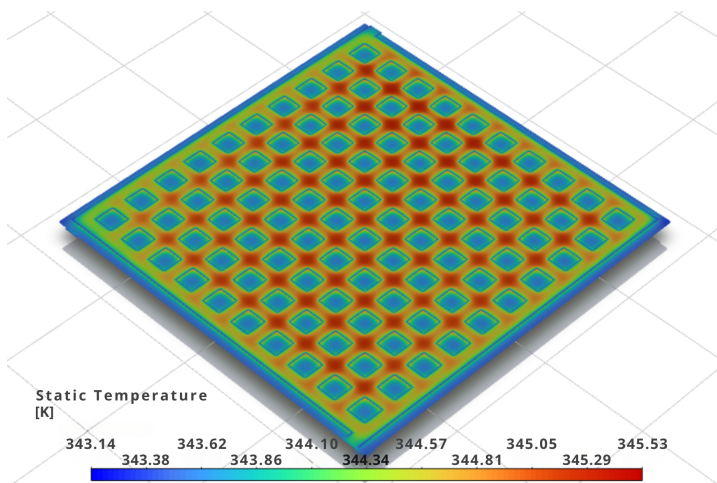
Obr. 24: Porovnanie pol. kriviek: ALL EQ bez MPL a referenčná krivka

Vplyv plynových kanálikov typu pin

Pre druhý typ kanálikov bola vytvorená geometria s rovnakými rozmermi ako referenčný model, ale novým kanálikom (pin $2,55 \times 2,55$ mm). Kým serpentínová má rovnomernú distribúciu a odvod vody, pinová znižuje tlakové straty, ale môže spôsobiť nehomogenitu a akumuláciu vody. Obr. 25 zobrazuje nižšie prúdové hustoty v koncentračných stratách. Priestorové rozloženia pri záťaži 0,7 V vidno na Obr. 26 a 27.

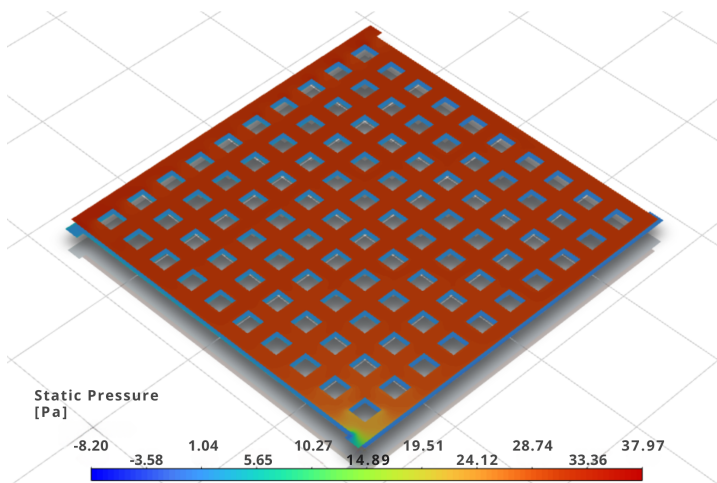


Obr. 25: Porovnanie pol. kriviek: ALL EQ Pin geometria a ref. krivka



Obr. 26: Priestorové rozloženie teploty, pin kanáliky

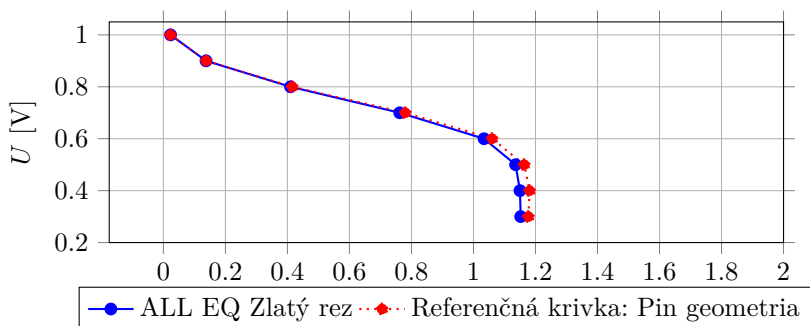
Na rozdiel od serpentínovej geometrie, pinová geometria zvyšuje reakčné a ohmické straty pre zložitejšie prúdenie plynov a dlhšie dráhy prenosu náboja a vody.



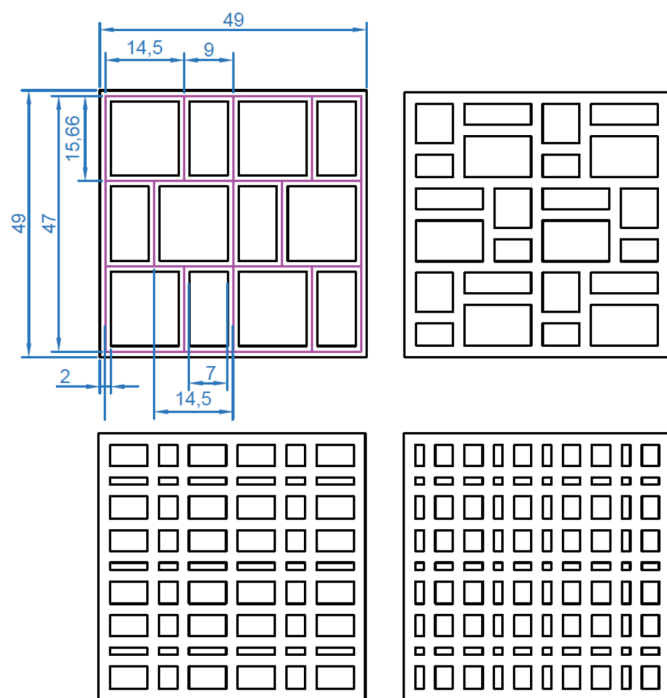
Obr. 27: Priestorové rozloženie tlaku PEMFC, pin kanáliky

2.7 Návrh geometrie inšpirovanej zlatým rezom

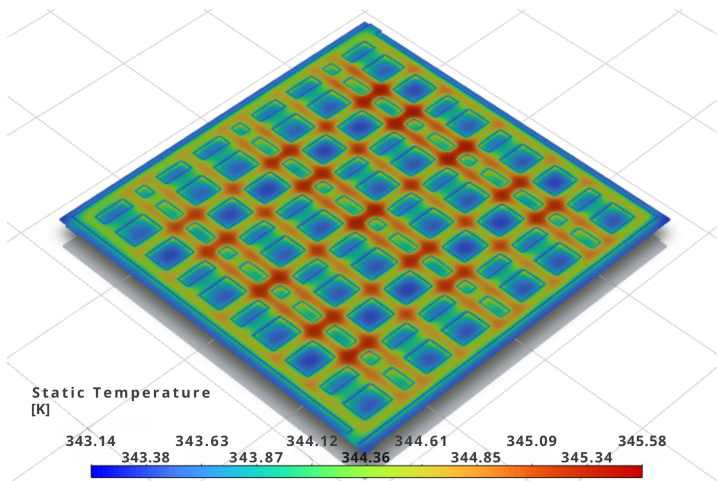
Táto práca predstavuje novú geometriu plynových kanálikov inšpirovanú prírodou, modifikovanú pin štruktúrou založenú na zlatom reze a Fibonacciho postupnosti. Porovnanie s pôvodnou pin geometriou (Obr. 28) ukazuje len mierny nárast prúdovej hustoty v prospech klasickej verzie. Nový návrh, znázornený na Obr. 29, má za cieľ rovnomernejšiu distribúciu plynov pri nízkych tlakových stratách. Využitie zlatého rezu prispieva k nižším ohmickým stratám a zníženej akumulácii vody vďaka stabilnejšej hydratácii membrány. Rozdiely v prúdovej hustote, teplotnom výkone a tlaku však zostávajú zanedbateľné (Obr. 30 a 31).



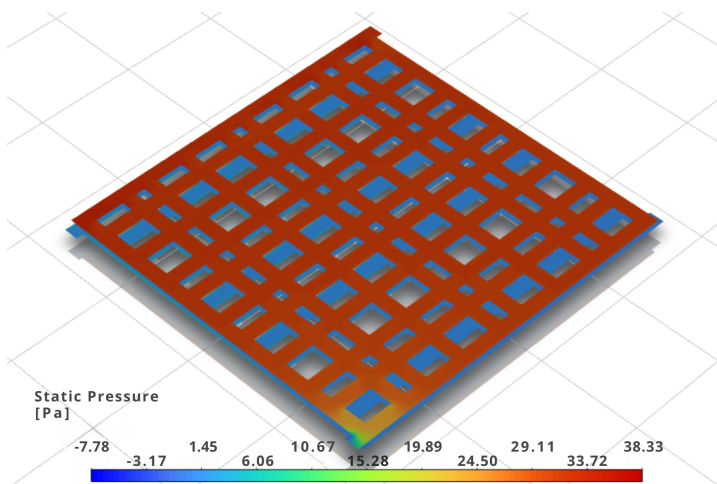
Obr. 28: Porovnanie pol. kriviek: Zlatý rez a pin geometria



Obr. 29: Postup vytvorenia siete inšpirovanej zlatým rezom



Obr. 30: Priestorové rozloženie teploty PEMFC, zlatý rez



Obr. 31: Priestorové rozloženie tlaku v PEMFC, zlatý rez

2.8 Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Prípadové štúdie potvrdili spoľahlivosť a univerzálnosť navrhnutých metodík pre rôzne konfigurácie PEMFC, vrátane inovatívnych geometrií kanálikov. Najmä pri nižších napätiach, ako 0,6 V a 0,5 V, sa často ukázala potreba aplikovať „Tip na nápravu divergencie“, čo poukazuje na nevyhnutnosť inžinierskeho dohľadu v komplexnej oblasti ohmických strát.

Analýza ďalej zvýraznila kľúčový význam MPL a celkovej geometrie plynových kanálikov pre presnosť simulácií. Z modelových rovníc sa ako najzásadnejšie preukázali UHP, CPM a BVR, zatiaľ čo IDH, KD a EPC je možné pri špecifických podmienkach zanedbať pre úsporu výpočtového času. Pozorovania tiež ukázali, že hoci vyššia prúdová hustota zvyšuje produkciu tepla, nie vždy je tento vzťah lineárny, napríklad absencia MPL môže pri rovnakej hustote viesť k odlišným tepelným stratám. Potvrdila sa opodstatnenosť popularity serpentínových kanálikov, avšak kanáliky typu pin môžu byť vhodné pre prípady s cieľom minimalizácie tlakových poklesov.

V konečnom dôsledku bol vytvorený komplexný prístup k analýze PEMFC, zameraný na spoľahlivé sieťovanie a simuláciu. Dôsledné overenie hustoty siete, vplyvu modelových rovníc a rôznych konfigurácií potvrdilo robustnosť navrhnutých postupov a jednoznačné splnenie všetkých stanovených cieľov práce.

Záver

Táto dizertačná práca poskytuje ucelený pohľad na problematiku modelovania a simulácie palivových článkov typu PEM, pričom spája komplexnú teóriu, rešerš aktuálneho vývoja, ako aj návrh praktických metodík pre simulácie. Hlavným cieľom bolo vytvoriť spoľahlivý postup pre numerické modelovanie kľúčových dejov prebiehajúcich v PEMFC, ktorý zohľadňuje previazanú komplexnosť systému, výpočtovú efektivitu a praktickú uplatniteľnosť.

V teoretickej časti práce boli podrobne rozobrané základné princípy fungovania palivových článkov, ich technický vývoj a možnosti uplatnenia v rôznych aplikačných oblastiach. Osobitnú pozornosť si zaslúži prehľad dejov prebiehajúcich v PEMFC, teda dôkladné spracovanie termodynamických, elektrochemických a transportných procesov, ktoré sú pre spoľahlivú prevádzku PEMFC nevyhnutné. Dôležitým prínosom bola aj sekcia venovaná princípu MKO a CFD, kde boli vysvetlené základné pojmy, proces diskretizácie, stabilita riešenia a špecifiká numerického spracovania úloh prúdenia. Táto časť vytvorila teoretický základ pre praktické simulačné úlohy a zároveň podčiarkla dôvody, prečo je aplikácia CFD pre PEMFC prínosná, no zároveň náročná.

V praktickej časti práce boli definované a úspešne riešené štyri hlavné úlohy ako prínosy práce a tri vedľajšie úlohy, ktoré smerovali k vytvoreniu spoľahlivého výpočtového postupu pre CFD simulácie PEMFC.

V prvej hlavnej úlohe bola vytvorená metodika tvorby výpočtovej siete, ktorá zahŕňala úvod do ICFM CFD, prípravu geometrie, definovanie ukazovateľov kvality siete a samotnú tvorbu siete pre model PEMFC. Neskôr bola podrobená aj citlivosťnej analýze hustoty prvkov, kde sa na prototypovom PEMFC analyzovali tri rôzne siete a vyhodnocovali sa dosiahnuté výsledky z hľadiska presnosti a výpočtových nákladov.

V druhej úlohe bola vytvorená metodika simulovania kľúčových modelových rovníc s cieľom identifikovať najvhodnejší postup pre dosiahnutie skonvergovaných výsledkov, kde bol definovaný referenčný prevádzkový stav PEMFC, diskutované využitie podrelaxačných faktorov a riešená problematika konvergenzie riešenia.

Na základe týchto metodík boli v tretej úlohe odsimulované a vyhodnotené prípadové štúdie, ktoré sledovali vplyv jednotlivých namodelovaných dejov vo vnútri PEMFC, konkrétne vplyv použitia polčlánkových potenciálov, katódového časticového modelu, rýchlosti Butler-Volmerovej rovnice, zahrnutia dynamického tlaku, Knudsenovej difúzie a efektívnej protónovej vodivosti v MEA, čo prinieslo cenné poznatky o tom, ako jednotlivé deje ovplyvňujú celkovú kvalitu výsledkov simulácie. Nasledovala analýza rôznych geometrií plynových kanálikov, ktorá sledovala aj vplyv

MPL a plynových kanálikov typu pin, ktorej výsledkom bolo kvantifikovanie vplyvu tvaru kanálikov a konštrukcie PEMFC, ale aj vizualizácia priestorového rozloženia parametrov ako sú tlak či teplota. Hlavným zistením týchto analýz bolo, že vplyv pol-článkových potenciálov, katódového časticového modelu, Butler-Volmerovej rovnice a mikroporéznej vrstvy nemožno zanedbať.

Vo štvrtjej úlohe bola navrhnutá vlastná geometria plynového kanálika na princípe zlatého rezu, ktorú sa podarilo úspešne odsimulovať a vyhodnotiť pomocou predchádzajúco navrhnutých metodík, čím bola preukázaná ich robustnosť a adaptabilita. Podrobná analýza dosiahnutých výsledkov pre túto vlastnú geometriu potvrdila praktickú aplikovateľnosť vyvinutých numerických metodík.

Simulácie realizované v rámci práce boli rozsiahle a výpočtovo náročné. Celkovo bolo spracovaných niekoľko desiatok výpočtových scenárov, ktoré slúžili na overenie stability, konzistencie a adaptability navrhnutých metodík. Výsledky ukazujú, že správna voľba modelových rovníc a výpočtovej siete má zásadný vplyv na kvalitu simulácií a ich výpovednú hodnotu pre technickú prax.

Prínos tejto práce je teda dvojúrovňový, jednak v oblasti systematického zhretnia teoretických poznatkov a výziev v oblasti PEMFC, a zároveň vo vytvorení prakticky overených výpočtových metodík, ktoré môžu slúžiť ako základ pre ďalší vývoj v oblasti numerického modelovania palivových článkov. Metodiky navrhnuté v tejto práci sú plne adaptovateľné pre modelovanie a simulácie alternatívnych geometrií, čo z nich robí vhodný nástroj do budúcnosti aj pre zložitejšie optimalizačné úlohy v rámci návrhu článkov, ktoré neboli súčasťou tejto práce.

Z pohľadu budúceho vývoja možno výsledky tejto dizertačnej práce využiť v niekoľkých smeroch. V prvom rade ako základ pre tvorbu ľubovoľných aj novonavrhnutých výpočtových 3D modelov PEMFC. Zároveň však má práca potenciál slúžiť ako súčasť štruktúry pre zložitejšie a modernejšie simulácie ako vývoj digitálnych dvojčiat systémov s PEMFC, ktoré umožňujú v reálnom čase monitorovať, diagnostikovať a predikovať správanie článku na základe kombinácie fyzikálnych modelov a dát z reálnej prevádzky. Takéto prepojenie modelu a reálneho systému je kľúčové pre zefektívnenie prevádzky, prediktívnu údržbu a zvýšenie spoľahlivosti vodíkových technológií ako celku.

V širšom kontexte tak práca prispieva k rozvoju numerických nástrojov a prístupov pre bezemisné energetické systémy a vytvára priestor pre ďalší výskum smerom k digitálnym riešeniam novej generácie.

Literatúra

1. MENCH, M. *Fuel Cell Engines*. Wiley, 2008. ISBN 9780471689584.
2. SUNDÉN, B. *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*. Elsevier Science, 2019. ISBN 9780128169513.
3. ARGYRIS, P. A.; WONG, J.; WRIGHT, A.; PEREIRA, L. M.; SPALLINA, V. Reducing the cost of low-carbon hydrogen production via emerging chemical looping process. *Energy Conversion and Management*. 2023, **277**, 116581. ISSN 0196-8904. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116581>.
4. BAGOTSKY, V.; SKUNDIN, A.; VOLFKOVICH, Y. *Electrochemical Power Sources: Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors*. Wiley, 2015. The ECS Series of Texts and Monographs. ISBN 9781118460238.
5. O'HAYRE, R.; CHA, S.; COLELLA, W.; PRINZ, F. *Fuel Cell Fundamentals*. Wiley, 2016. ISBN 9781119113805.
6. HACKER, V.; MITSUSHIMA, S. *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research*. Elsevier Science, 2018. ISBN 9780128114599.
7. MURÍN, J.; KALOUSEK, M.; KUTIŠ, V. *Mechanika a termomechanika: vybrané kapitoly pre elektrotechnikov*. Slovenská technická univerzita, 2006. Edícia skript. ISBN 9788022723930.
8. SRINIVASAN, S. *Fuel cells: From fundamentals to applications*. 2006. Dostupné z DOI: 10.1007/0-387-35402-6.
9. VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, 2007. ISBN 9780131274983.
10. HISSEL, D. et al. A Review on Existing Modeling Methodologies for PEM Fuel Cell Systems. 2008.
11. ARIF, M.; CHEUNG, S.; ANDREWS, J. Different Approaches Used for Modeling and Simulation of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: A Review. *Energy & Fuels*. 2020, **34**. Dostupné z DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c02414.

12. MOEIN-JAHROMI, M.; KERMANI, M. Performance prediction of PEM fuel cell cathode catalyst layer using agglomerate model. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012, **37**(23), 17954–17966. ISSN 0360-3199. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.120>.
13. XING, L.; MAMLOUK, M.; SCOTT, K. A two dimensional agglomerate model for a proton exchange membrane fuel cell. *Energy*. 2013, **61**, 196–210. ISSN 0360-5442. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.026>.
14. ARIF, M.; CHEUNG, S. C.; ANDREWS, J. A systematic approach for matching simulated and experimental polarization curves for a PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, **45**(3), 2206–2223. ISSN 0360-3199. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.057>.
15. MAIZIA, R.; DIB, A.; THOMAS, A.; MARTEMIANOV, S. Proton exchange membrane fuel cell diagnosis by spectral characterization of the electrochemical noise. *Journal of Power Sources*. 2017, **342**, 553–561. ISSN 0378-7753. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.053>.
16. KIM, J.; LEE, I.; TAK, Y.; CHO, B. State-of-health diagnosis based on hamming neural network using output voltage pattern recognition for a PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012, **37**(5), 4280–4289. ISSN 0360-3199. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.092>. Portable Fuel Cells – Fundamental and Applications (ISFPC2010).
17. DODDATHIMMAIAH, A.; ANDREWS, J. Theory, modelling and performance measurement of unitised regenerative fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009, **34**(19), 8157–8170. ISSN 0360-3199. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.116>.
18. GUARNIERI, M.; ALOTTO, P.; MORO, F. Modeling the performance of hydrogen–oxygen unitized regenerative proton exchange membrane fuel cells for energy storage. *Journal of Power Sources*. 2015, **297**, 23–32. ISSN 0378-7753. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.067>.
19. JIN, D.; OCONE, R.; JIAO, K.; XUAN, J. Energy and AI. *Energy and AI*. 2020, **1**, 100002. ISSN 2666-5468. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100002>.

20. ZUO, Q. et al. Digital twinning of multi-physics field performance of faceted novel snake coil flow field proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2025, **649**. ISSN 0378-7753. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237442>.
21. NAANANI, H.; NACHTANE, M.; FAIK, A. Advancing hydrogen safety and reliability through digital twins: Applications, models, and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025, **115**, 344–360. ISSN 0360-3199. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.440>.
22. ZHANG, M.; AMIRI, A.; XU, Y.; BASTIN, L.; CLARK, T. Self-adaptive digital twin of fuel cell for remaining useful lifetime prediction. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024, **89**, 634–647. ISSN 0360-3199. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.266>.
23. QI, X. et al. Digital twin development for PEMFC degradation estimation and aging data generation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024, **95**, 1011–1021. ISSN 0360-3199. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.222>.
24. LI, W. et al. Experimental and numerical analysis of a three-dimensional flow field for PEMFCs. *Applied Energy*. 2017, **195**, 278–288. Dostupné z DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.008>.
25. IRANZO, A.; MUÑOZ, M.; ROSA, F.; PINO, J. Numerical model for the performance prediction of a PEM fuel cell. Model results and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, **35**, 11533–11550. Dostupné z DOI: [doi:10.1016/j.ijhydene.2010.04.129](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.129).
26. OMRAN, A. et al. Mathematical model of a proton-exchange membrane (PEM) fuel cell. *International Journal of Thermofluids*. 2021, **11**, 100110. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100110>.
27. YANG, L. et al. Optimization of the structure and cathode operating parameters of a serpentine PEMFC with longitudinal vortex generators by response surface method. *Renewable Energy*. 2024, **220**, 119692. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119692>.

28. RICCARDI, M. et al. Experimental Validation of a 3D-CFD Model of a PEM Fuel Cell. In: *E3S Web of Conferences*. 2020, zv. 197, s. 05004. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019705004>.
29. DENG, Q. et al. Study on the heat and mass transfer mechanisms of liquid-cooled PEMFC stacks based on non-isothermal model. *Energy Conversion and Management*. 2024, **313**, 118628. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118628>.
30. ASKARIPOUR, H. Effect of operating conditions on the performance of a PEM fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, **144**, 118705. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118705>.
31. HASHEMI, F.; ROWSHANZAMIR, S.; REZAKAZEMI, M. CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields. *Mathematical and Computer Modelling*. 2012, **55**(3-4), 1540–1557. Dostupné z DOI: [doi:10.1016/j.mcm.2011.10.047](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.047).
32. AL-BAGHDADI, M. A. R. S. A CFD model for analysis of performance, water and thermal distribution, and mechanical related failure in PEM fuel cells. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. 2016, **7**, 7–20. Dostupné z DOI: [10.14203/j.mev.2016.v7.7-20](https://doi.org/10.14203/j.mev.2016.v7.7-20).

Použitie nástrojov umelej inteligencie

Autor týmto v zmysle Opatrenia číslo 1/2024–O Slovenskej technickej univerzity v Bratislave čestne vyhlasuje, že pri písaní tejto dizertačnej práce použil nižšie uvedené nástroje umelej inteligencie výlučne na podporu jazykovej úpravy textu a prekladov do slovenského jazyka. Tieto nástroje boli použité s cieľom zvýšiť gramatickú správnosť a zrozumiteľnosť odborného textu, pričom odborný obsah, štruktúra a vedecký zámer práce boli plne v autorskej rézii. Použité nástroje umelej inteligencie:

OpenAI (2025), ChatGPT 4o

Google (2025), Gemini 2.5 Flash

DeepL Translator (2025)

Zoznam publikácií autora

Autor: Uličný, Michal Miloslav

ORCID: 0000-0002-8515-3414

WOS: JJP-3199-2023

SCOPUS: 58289537000

Zobrazovací formát: Zoznam dokumentov podľa ISO690 - nová kategorizácia

Štatistika: Kategória publikačnej činnosti od 2022

V1 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako celok

- V1_01 PAULECH, Juraj (zost.) - ULIČNÝ, Michal Miloslav (zost.) - BERTA, Šimon (zost.) - ZÁŇOVÁ, Zuzana (zost.). *Applied mechanics 2023 : 24th International conference : Book of Abstracts. Piešťany, Slovakia. April 19-21, 2023*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023. 140 s. ISBN 978-80-227-5294-7.
Typ výstupu: zborník; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: FAI

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- V2_01 GÁLIK, Gabriel - GOGA, Vladimír - ULIČNÝ, Michal Miloslav - MURÍN, Justín. Experimental analysis of the working activity of the coiled nylon spring actuator. In *Applied mechanics 2022 : 23rd International conference : Book of Abstracts. Liblice, Czech Republic. April 4-6, 2022*. Prague : Czech Technical University in Prague, 2022, S. 35-38. ISBN 978-80-01-06974-5.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_02 GÁLIK, Gabriel - SEDLÁR, Tibor - GOGA, Vladimír - ULIČNÝ, Michal Miloslav - MURÍN, Justín. Experimental measurements of nylon coil spring thermal properties. In *Applied mechanics 2023 : 24th International conference : Book of Abstracts. Piešťany, Slovakia. April 19-21, 2023*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, S. 25-28. ISBN 978-80-227-5294-7.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_03 GÁLIK, Gabriel - SEDLÁR, Tibor - GOGA, Vladimír - ULIČNÝ, Michal Miloslav - MURÍN, Justín. Experimental Measurements of Nylon Coil Spring Properties for Validation of Numerical Models. In *APCOM 2023 : 28th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 21-23, 2023*. Melville : AIP Publishing, 2024, Art. no. 030003 [4] s. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4805-6 (2024: 0.153 - SJR). V databáze: DOI: 10.1063/5.0187960 ; SCOPUS: 2-s2.0-85184824515.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_04 GÁLIK, Gabriel - ULIČNÝ, Michal Miloslav - BERTA, Šimon - PAULECH, Juraj. System Model of Battery Module Using Computational Fluid Dynamics Thermal Analysis. In *APCOM 2024 : 29th International Conference on Applied Physics of*

Condensed Matter, Štrbské Pleso, Slovak Republic, 19-21 June 2024. 1. vyd. Melville : AIP Publishing, 2024, Art. no. 060006 [5] s. ISSN 0094-243X (2024: 0.153 - SJR). V databáze: DOI: 10.1063/5.0236300 ; SCOPUS: 2-s2.0-85208432634.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_05 KUTIŠ, Vladimír - PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel - MURÍN, Justín - GOGA, Vladimír - ULÍČNÝ, Michal Miloslav - BERTA, Šimon. Beam finite element with piezoelectric layers - modeling and control. In *WCCM-APCOM Congress 2022 : 15th World Congress on Computational Mechanics. 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics. Yokohama, Japan. July 31-August 5, 2022*. Barcelona : CIMNE, 2022, S. 1438. ISBN 978-84-123222-8-6. V databáze: SCOPUS.
Typ výstupu: abstrakt z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFG

V2_06 PAULECH, Juraj - MURÍN, Justín - ULÍČNÝ, Michal Miloslav - GOGA, Vladimír - KUTIŠ, Vladimír - GÁLIK, Gabriel - SEDLÁR, Tibor - BERTA, Šimon - ŠARKÁN, Ladislav. Analysis of actuator structure using new electro-thermo-mechanical finite element derived for functionally graded materials. In *WCCM-APCOM Congress 2022 : 15th World Congress on Computational Mechanics. 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics. Yokohama, Japan. July 31-August 5, 2022*. Barcelona : CIMNE, 2022, [9] s. ISBN 978-84-123222-8-6. V databáze: DOI: 10.23967/wccm-apcom.2022.019 ; SCOPUS.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_07 PAULECH, Juraj - MURÍN, Justín - KUTIŠ, Vladimír - GÁLIK, Gabriel - ULÍČNÝ, Michal Miloslav. Behaviour of coolant in VVER-440 under major outage conditions. In *APCOM 2022 : 27th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 22-24, 2022*. 1. ed. Melville : AIP Publishing, 2023, Art. no. 060006 [4] s. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4479-9 (2023: 0.152 - SJR). V databáze: DOI: 10.1063/5.0137657 ; SCOPUS: 2-s2.0-85160247112 ; WOS: 001055613400063.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_08 PLZÁK, Milan - BAŤA, Martin - PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel - ULÍČNÝ, Michal Miloslav - BERTA, Šimon - ŮRGE, Andrej. Multiphysics Model of a Battery Module. In *Cybernetics & Informatics (K&I) 2025 : 32nd International IEEE conference. Mikulov, Czech Republic. February 2-5, 2025*. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2025, S. 245-250. ISSN 2767-875X. ISBN 979-8-3315-4181-1. V databáze: DOI: 10.1109/KI64036.2025.10916425 ; IEEE: 10916425.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_09 PLZÁK, Milan - BAŤA, Martin - PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel - ULÍČNÝ, Michal Miloslav - BERTA, Šimon - ŮRGE, Andrej. Digital Twin for Battery Systems: Review and Conceptual Hybrid Modeling Framework. In *ELITECH '25 : 27th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. May 28, 2025*. 1. vyd. Bratislava :

Vydavateľstvo Spektrum STU, 2025, [7] s. ISBN 978-80-227-5492-7.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

- V2_10 ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír - PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel. CFD analysis of straight channel PEM fuel cell. In *Applied mechanics 2022 : 23rd International conference : Book of Abstracts. Liblice, Czech Republic. April 4-6, 2022*. Prague : Czech Technical University in Prague, 2022, S. 117-120. ISBN 978-80-01-06974-5.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_11 ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír. System modelling of a proton exchange membrane fuel cell and its comparison at extreme loads. In *2022 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : Proceedings ; 31st International Conference; 11-14 September 2022 Visegrád, Maďarsko*. 1. vydanie. Danvers, Massachusetts, USA : IEEE, 2022, [4] s. ISBN 978-1-6654-8775-7. V databáze: DOI: 10.1109/KI55792.2022.9925941 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142054925 ; IEEE: 9925941.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_12 ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír. Design of the mechanical component for piezoelectric energy harvesting. In *Applied mechanics 2023 : 24th International conference : Book of Abstracts. Piešťany, Slovakia. April 19-21, 2023*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, S. 125-128. ISBN 978-80-227-5294-7.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_13 ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír. Three-dimensional CFD modelling and simulation of a PEM fuel cells. In *APCOM 2022 : 27th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 22-24, 2022*. 1. ed. Melville : AIP Publishing, 2023, Art. no. 030013 [7] s. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4479-9 (2023: 0.152 - SJR). V databáze: DOI: 10.1063/5.0135862 ; SCOPUS: 2-s2.0-85160226007 ; WOS: 001055613400018.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_14 ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír - MIKULOVÁ, Tímea - PAULECH, Juraj. Numerical Analysis of PEM Fuel Cell. In *APCOM 2023 : 28th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 21-23, 2023*. Melville : AIP Publishing, 2024, Art. no. 060002 [8] s. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4805-6 (2024: 0.153 - SJR). V databáze: DOI: 10.1063/5.0187455 ; SCOPUS: 2-s2.0-85184819406.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_15 ULIČNÝ, Michal Miloslav - BAŤA, Martin - GÁLIK, Gabriel - PAULECH, Juraj - BERTA, Šimon - ŮRGE, Andrej. ROM of CFD Simulations: Application for a Part of Battery. In *Applied mechanics 2024 : 25th International conference : Book of Articles. Štrbské Pleso, Slovakia. April 17-19, 2024*. Žilina : University of Žilina, 2024, S. 180-183.

ISBN 978-80-554-2090-5.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

- V2_16 ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír - SZABÓ, Bence - ONDREJIČKA, Kristián. Thermal Analysis of 20 W PEMFC Stack. In *APCOM 2024 : 29th International Conference on Applied Physics of Condensed Matter, Štrbské Pleso, Slovak Republic, 19-21 June 2024*. 1. vyd. Melville : AIP Publishing, 2024, Art. no. 060001 [7] s. ISSN 0094-243X (2024: 0.153 - SJR). V databáze: DOI: 10.1063/5.0235352 ; SCOPUS: 2-s2.0-85208445666.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

- V2_17 ULIČNÝ, Michal Miloslav - BAŤA, Martin - BERTA, Šimon - GÁLIK, Gabriel - PAULECH, Juraj - PLZÁK, Milan - ŮRGE, Andrej. Thermal Performance Analysis of a Single Battery Cell: Experimental and Simulation Approaches with Active Cooling. In *Cybernetics & Informatics (K&I) 2025 : 32nd International IEEE conference. Mikulov, Czech Republic. February 2-5, 2025*. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2025, S. 234-238. ISSN 2767-875X. ISBN 979-8-3315-4181-1. V databáze: DOI: 10.1109/KI64036.2025.10916448 ; IEEE: 10916448.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

- V2_18 WOLLENTOVÁ, Hortenzia - ULIČNÝ, Michal Miloslav. Edukačná aplikácia v programe MATLAB: Modelovanie dejov v PEMFC. In *ŠVOČ 2024 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác. 9. apríl 2024*. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2024, S. 45-50. ISBN 978-80-227-5411-8.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

- V3_01 ONDREJIČKA, Kristián - GOGA, Vladimír - BERTA, Šimon - ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír. Hydrogen Production Using PVs with MPPT Optimization. In *Hydrogen*. Vol. 6, iss. 2 (2025), art. no. 41 [25] s. ISSN 2673-4141. V databáze: DOI: 10.3390/hydrogen6020041 ; SCOPUS: 2-s2.0-105009290501 ; WOS: 001514864600001. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM

- V3_02 ULIČNÝ, Michal Miloslav - CIGÁNEK, Ján - KUTIŠ, Vladimír - KUČERA, Erik - ŠEDIVÝ, Ján. Modeling and Co-Simulation of Fuzzy Logic Controller for Artificial Cybernetic Hand. In *Multimodal Technologies and Interaction*. Vol. 9, iss. 2 (2025), Art. no. 12 [28] s. ISSN 2414-4088 (2023: 2.4 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.544 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/mti9020012 ; WOS: 001430237400001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85219191016.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM

O2 Odborný výstup publikačnej činnosti ako časť knižnej publikácie alebo zborníka

- O2_01 ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír. Modelling of processes in PEM fuel cell. In *ELITECH '22 [elektronický zdroj] : 24th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. June 1, 2022*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU,

2022, [5] s. ISBN 978-80-227-5192-6.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: BEF

- O2_02 ULIČNÝ, Michal Miloslav - KUTIŠ, Vladimír. Design of a piezoelectric component for energy harvesting during walking. In *ELITECH '23 [elektronický zdroj] : 25th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. May 31, 2023*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, [5] s. ISBN 978-80-227-5298-5.
- Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: BEF

Štatistika: kategória publikačnej činnosti od 2022

V1	Vedecký výstup publikačnej činnosti ako celok	1
V2	Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka	18
V3	Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu	2
O2	Odborný výstup publikačnej činnosti ako časť knižnej publikácie alebo zborníka	2
Súčet		23

Štatistika: kategória ohlasov od 2022

Citácia v publikácii registrovaná v citačných indexoch	
Zahraničné	2
Domáce	0
Súčet	2

Zdroje metrík: Clarivate, Scopus a Journalmetrics