

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V
BRATISLAVE
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

Ing. Kristián Ondrejička

Autoreferát dizertačnej práce

**Energetická bilancia kombinovaných zdrojových
systémov**

Na získanie akademického titulu

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

v študijnom programe: Mechatronické systémy

v študijnom odbore: kybernetika

forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava, 27.08.2025

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 2961, 841 04 Karlova Ves

Predkladateľ:

Ing. Kristián Ondrejčka
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 2961, 841 04 Karlova Ves

Školiteľ:

doc. Ing. Vladimír Goga, PhD.
Ústav automobilovej mechatroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 2961, 841 04 Karlova Ves

Oponenti:

doc. Ing. Milan Nad', CSc.

Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mecha-
troniky

Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Tr-
nave

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Ulica Jána Bottu č. 2781/25

917 24 Trnava

milan.nad@stuba.sk

Ing. Juraj Matej, PhD.

Mandľová 63

851 10 Bratislava

juraj.matej@testek.sk

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa

o hod.na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU
v Bratislave, Ilkovičova 2961, 841 04 Karlova Ves,
v miestnosti

.....

prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

Anotácia

Slovenská technická univerzita v Bratislave

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný odbor: Kybernetika

Študijný program: Mechatronické systémy

Autor: Ing. Kristián Ondrejička

Dizertačná práca: Energetická bilancia kombinovaných zdrojových systémov

Vedúci práce: doc. Ing. Vladimír Goga, PhD.

Mesiac a rok odovzdania: Júl 2025

Kľúčové slová: FV panely, modulárny záložný zdroj energie, PEMEL, PEMFC, vodíkové technológie

Táto práca sa zameriava na komplexnú analýzu, modelovanie a simuláciu interoperability kľúčových komponentov moderných energetických systémov: obnoviteľných zdrojov energie (OZE), batériových systémov a vodíkových technológií. Hlavným cieľom je navrhnúť a optimalizovať stacionárny systém pre výrobu a uskladnenie vodíka, pričom sa prioritne kladie dôraz na zlepšenie ekologických aspektov prevádzky. Zároveň je nevyhnutné zachovať robustné ekonomické parametre, čo zahŕňa efektivitu nákladov a návratnosť investícií. Podrobne sa skúmajú synergické efekty integrácie týchto technológií, ako aj potenciál znižovania uhlíkovej stopy a zvyšovania energetickej sebestačnosti. Práca tiež hodnotí dynamické správanie systému pri rôznych prevádzkových podmienkach a navrhuje stratégie pre maximálnu udržateľnosť a rentabilitu.

Abstract

Slovak University of Technology in Bratislava
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study Branch: cybernetics
Study Programme: Applied mechatronics and electromobility
Author: Ing. Kristián Ondrejčka
Thesis: Energy balance of combined source systems
Supervisor: doc. Ing. Vladimír Goga, PhD.
Submitted: July 2025
Keywords: Hydrogen technologies, modular backup power supply, PEMEL, PEMFC, PV panels

This work focuses on the comprehensive analysis, modeling and simulation of the interoperability of key components of modern energy systems: renewable energy sources (RES), battery systems and hydrogen technologies. The main objective is to design and optimize a stationary system for hydrogen production and storage, with priority given to improving the environmental aspects of the operation. At the same time, it is essential to maintain robust economic parameters, which include cost-effectiveness and return on investment. The synergistic effects of integrating these technologies are investigated in detail, as well as the potential for reducing the carbon footprint and increasing energy self-sufficiency. The work also evaluates the dynamic behavior of the system under different operating conditions and suggests strategies for maximum sustainability and profitability.

Obsah

Úvod 9

1 Modelovanie komponentov systému fotovoltaických panelov a elektrolyzéra typu PEM	10
1.1 Fotovoltické panely	10
1.1.1 Dáta slnečnej radiácie pre potreby simulačného modelu	12
1.2 Meniče DC – DC.....	13
1.3 Batériové úložisko.....	13
1.4 PEMEL systém.....	14
1.5 Riadenie energetických tokov FV systému	16
1.5.1 Look-Up Table - Matematický model riadenia FV systému	16
1.5.2 Logika riadenia energetických tokov FV systému	17
1.5.3 Výsledky simulácií navrhovaného systému	18
2 Modelovanie palivového článku typu PEM	20
2.1 Matematicko-simulačný model palivového článku typu PEM.....	20
2.2 Výstup matematicko-simulačný model palivového článku typu PEM.....	22
3 Overovanie matematicko-simulačných modelov meraním reálnych zariadení	23
3.1 Zostavenie a meranie zmenšeného modelu FV systému na výrobu zeleného vodíka	23
3.1.1 Softvérový návrh merania	24
3.1.2 Testovacie meranie FV modelu s nízkym výstupným výkonom	24
3.2 Meranie laboratórneho palivového článku typu PEM	27
4 Návrh modulárneho systému s výstupným výkonom 100 kWp	29
4.1 Návrh systému fotovoltaických panelov s výkonom 100 kWp.....	29
4.2 Návrh batériového úložiska s kapacitou 660 kWh	30
4.2.1 Simulácia batériového úložiska s kapacitou 660 kWh	31
4.3 Elektrolyzér typu PEM s príkonom 100 kW	32
4.4 Návrh úložiska vodíka.....	33
4.5 Energetické toky simulovaného modulárneho systému s výstupným výkonom 100 kWp.....	33
4.5.2 Simulácia systému s nabitým batériovým úložiskom.....	35
4.5.3 Simulácia systému s vybitým batériovým úložiskom	36
5 Štúdia využiteľnosti navrhovaného modulárneho systému v automobilovom sektore	37
5.1 Výber simulovaného autobusu a normovanie spotreby	37
5.2 Modelovanie a simulovanie reálneho jazdného cyklu.....	38
5.3 Porovnanie spotreby vodíkového autobusu a možností výroby vodíka navrhovaného modulárneho systému	40
5.3.1 Simulácia produkcie vodíka pri nabitom batériovom systéme.....	40
5.4 Ekonomická a ekologická bilancia navrhovaného modulárneho systému	42
Záver	44

Literatúra	45
Zoznam publikácií autora	46
Použitie nástrojov umelej inteligencie	48
Prílohy	49

Úvod

Automobilový priemysel je neoddeliteľnou súčasťou moderného života, nielen v oblasti osobnej dopravy, ale aj prepravy tovaru. V poslednom období však narastá počet diskusií o jeho vplyve na životné prostredie, zvyšujúcom sa výskyte respiračných ochorení spôsobených znečistením ovzdušia a postupnom úbytku nerastných surovín.

Otázka, či je možné ďalej zdokonaľovať spaľovacie motory, je čoraz aktuálnejšia. Mnohé automobilky preto volia cestu elektromobility a v stacionárnych aplikáciách sa prikláňajú k obnoviteľným zdrojom energie, prípadne kombináciu viacerých zdrojových systémov. Tento trend sa dostal do povedomia verejnosti pod označením hybridný systém. Napriek sľubnému názvu však tento prístup neodstraňuje uvedené problémy, keďže stále zahŕňa využívanie spaľovacieho motora. Hlavným obmedzením výlučne elektrického pohonu v mobilných aj stacionárnych aplikáciách zostáva otázka skladovania dostatočného množstva elektrickej energie z pohľadu konkurencieschopnosti systémom so spaľovacím motorom.

Na uchovávanie elektrickej energie sa dnes využíva viacero technológií, pričom medzi najvýznamnejšie patria akumulátory, superkapacity a vodíkové technológie. Najväčší potenciál ponúka skladovanie energie vo forme vodíka vo vysokotlakových nádržiach, pričom v kombinácii s palivovými článkami je možné túto energiu efektívne premieňať na elektrickú energiu v požadovanom množstve. Žiadna zo spomenutých technológií však zatiaľ neponúka dostatočnú kapacitu na uchovanie elektrickej energie s hustotou porovnateľnou s fosílnymi palivami. Každá z nich má svoje výhody i nevýhody. Ako najperspektívnejšie riešenie sa javí kombinácia jednotlivých zdrojov do jedného celku, tzv. hybridizácia energetického úložiska. Tento prístup umožňuje vzájomnú kompenzáciu slabších stránok jednej technológie silnými stránkami druhej.

Výskum prezentovaný v práci sa zameriava na analýzu, modelovanie a simuláciu interoperability úložiskových systémov v kombinácii s vodíkovými technológiami a obnoviteľnými zdrojmi energie. Cieľom je navrhnuť a vytvoriť ekologickejší zdroj elektrickej energie pri zachovaní ekonomických parametrov fosílnych palív. Výskum sa sústreďuje na návrh 100 kWp stacionárneho modulárneho záložného zdroja energie, ktorý využíva obnoviteľné zdroje a vodíkové technológie, ako sú elektrolyzér a palivový článok. Kľúčovým aspektom je vývoj efektívneho a udržateľného systému, ktorý optimalizuje využitie energie, zabezpečuje spoľahlivosť a predlžuje životnosť komponentov. Výskum zahŕňa detailnú analýzu, simuláciu a optimalizáciu fotovoltaických panelov, systémov skladovania energie a procesov elektrolyzy, pričom sa zohľadňujú rôzne prevádzkové podmienky s cieľom dosiahnuť maximálnu efektivitu a stabilitu celého systému.

1 Modelovanie komponentov systému fotovoltických panelov a elektrolyzéra typu PEM

Pre modelovanie multifyzikálneho systému určeného na výrobu vodíka z obnoviteľných zdrojov energie bolo použité simulačné prostredie Simscape, ktoré je súčasťou platformy MATLAB/Simulink. Simscape umožňuje tvorbu modelov fyzických komponentov založených na reálnych fyzikálnych princípoch, ako sú elektrina, mechanika, teplo, hydraulika alebo chemické procesy. Jednou z jeho hlavných výhod je schopnosť vytvárať modely, ktoré sa priamo integrujú s blokovými schémami v prostredí Simulink, čím sa dosahuje vyššia flexibilita a prehľadnosť pri návrhu a simulácii komplexných systémov. Komponenty v Simscape sú jednoducho parametrizovateľné pomocou fyzikálnych veličín a umožňujú efektívne kombinovanie viacerých typov energií v jednom modeli. Okrem toho je Simscape plne kompatibilný s ostatnými modelovacími nástrojmi, čo umožňuje rozšírenie simulácií napríklad o riadiace algoritmy, optimalizačné úlohy, či spracovanie dát. Vďaka týmto vlastnostiam je Simscape ideálnym nástrojom na vývoj, testovanie a analýzu systémov pre výrobu vodíka z obnoviteľných zdrojov, ako sú fotovoltické panely, veterné turbíny, či palivové články.

1.1 Fotovoltické panely

Pre zjednodušenie verziu systému boli využité štyri solárne moduly značky Cellevia, každý s menovitým výkonom 20 W, čím bol dosiahnutý celkový inštalovaný výkon 80 W. Pri výbere fotovoltických panelov pre túto aplikáciu bola jedinou požiadavkou ich monokryštalická technológia a kompatibilita s ostatnými komponentmi systému z hľadiska elektrických parametrov, ako sú napätie, prúd a výkon. V praxi zohráva významnú úlohu aj ekonomický faktor – konkrétne pomer výkonu k cene, udávaný v jednotkách W/€.

Technická dokumentácia v **Tab. 1** obsahuje všetky kľúčové údaje potrebné na vytvorenie simulačného modelu.

Tab. 1 Parametre solárneho panela CL-SM20M [36]

Parameter	Hodnota
Max. výkon	20 W
Napätie pri P_{max} (V_{mpp})	18,6 V
Prúd pri P_{max} (I_{mpp})	1,08 A
Napätie naprázdno	22,9 V
Skratový prúd	1,12 A
Teplotný koeficient V_{oc}	$-(0,40 \pm 0,05) \text{ \% / } ^\circ\text{C}$
Teplotný koeficient I_{sc}	$(0,065 \pm 0,01) \text{ \% / } ^\circ\text{C}$
Teplotný koeficient výkonu PPV	$-(0,5 \pm 0,05) \text{ \% / } ^\circ\text{C}$
NOCT ($T=20^\circ\text{C}$, $G_{NOCT}=800\text{W/m}^2$, $v=1\text{m/s}$)	$47 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$
Usporiadanie článkov (Ser. $\times$ Par.)	36 (4 $\times$ 9)
Rozmery modulu	435 $\times$ 356 $\times$ 25 mm

Prevádzkový bod panelu, v ktorom dosahuje maximálny výkon (P_{max}), je určený konkrétnou kombináciou výstupného napätia a prúdu. Tento bod nie je konštantný – mení sa nielen v závislosti od intenzity slnečného žiarenia, ale aj vplyvom teplotných zmien. Zvýšenie prevádzkovej teploty panelu je spôsobené jednak

samotným priebehom fotovoltického efektu v polovodičovej štruktúre (ekvivalentnej dióde), a zároveň aj zvyšovaním vonkajšej teploty prostredia. Vnútna teplota panelu rastie približne lineárne v závislosti od okolitých podmienok – konkrétne intenzity žiarenia a teploty vzduchu – a túto závislosť popisujú teplotné koeficienty V_{oc} (napätie naprázdno), I_{sc} (skratový prúd) a P_{max} (maximálny výkon).

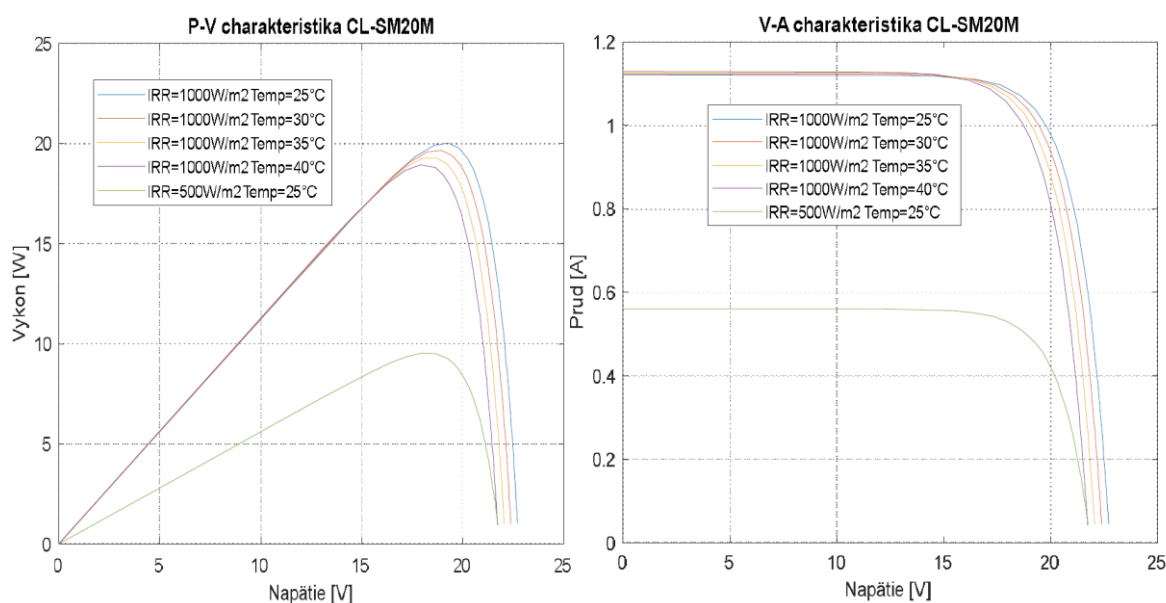
Kvalita použitých materiálov vo fotovoltickej bunke výrazne ovplyvňuje veľkosť týchto koeficientov – čím sú koeficienty nižšie, tým stabilnejší a vyšší je výstupný výkon panelu. Parameter NOCT (z angl. Nominal Operating Cell Temperature) udáva teplotu bunky za štandardných testovacích podmienok (STC z angl. Standard Testing Conditions), a slúži ako základ pre výpočet skutočnej prevádzkovej teploty panelu:

$$T_{FV} = \frac{G}{G_{NOCT}} * (NOCT - T_{amb}) + T \quad (1)$$

Kde $G \left[\frac{W}{m^2} \right]$ je aktuálna radiácia a T je aktuálna teplota okolia. V simulácii bola teplota fotovoltického panela určená z dát o okolitej teplote (NREL - National Renewable Energy Laboratory) a následne zohľadnená v celkovej účinnosti systému. FV panel je v prostredí Simscape reprezentovaný blokom svetelnej diódy, ktorý simuluje zdroj prúdu solárneho článku. Tento model zahŕňa vplyv solárne indukovaného prúdu, závislosť na teplote, preddefinované parametre a tepelný port. Model umožňuje výber medzi 5 a 8 parametrovými simulačnými modelmi podľa dostupných technických údajov. Celý FV panel, zložený zo 4×9 článkov, je modelovaný jedným blokom svetelnej diódy.

Parametrizácia modelu vychádza z databázy reálnych FV panelov. Okrem základných parametrov z dátového listu model obsahuje aj hodnoty vnútorných odporov, saturačné prúdy diód, exponenciálne nárasty prúdu diódami v závislosti od teploty a aktivačnú energiu. Pre simuláciu bol vybratý monokryštalický panel s full-cell bunkou.

Obr. 1 ukazuje P-V a V-A charakteristiky reálneho FV panela CL-SM20M. Vyššia teplota znižuje výkon panela, najmä v oblasti jeho optimálnej prevádzky. Tento jav je spôsobený poklesom potenciálového rozdielu v štruktúre panela – hoci prúd s teplotou rastie, napätie klesá.



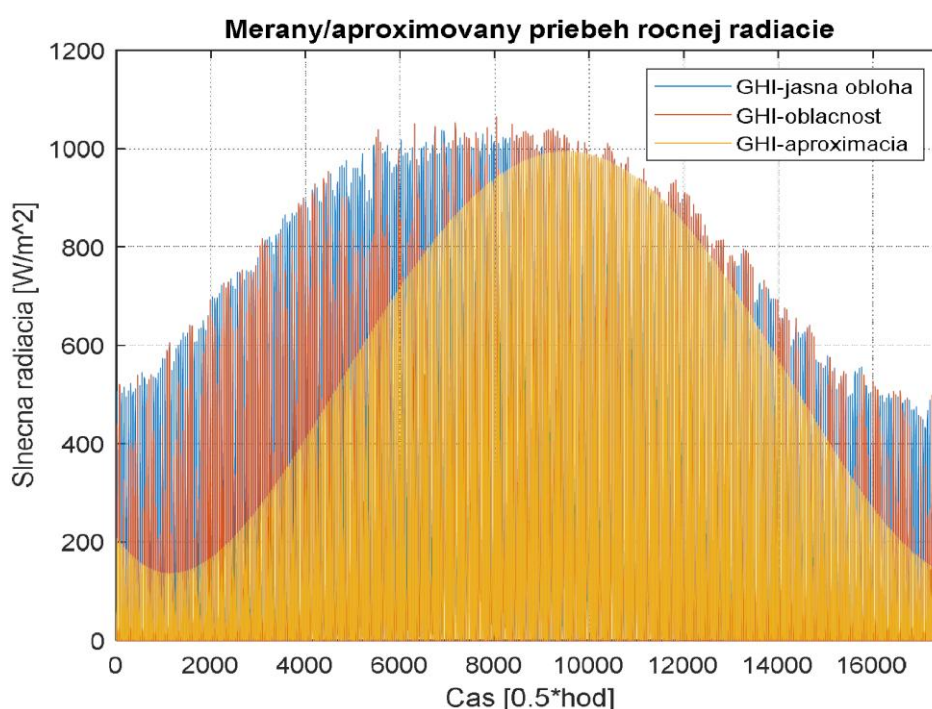
Obr. 1 P-V a V-A charakteristika PV panelu CLSM20M

Monokryštalický panel reaguje lepšie na zmenené svetelné podmienky než polykryštalický. Zmena radiácie priamo ovplyvňuje produkovaný prúd: ak sa radiácia zníži o polovicu, prúd a tým aj výstupný výkon klesnú na polovicu. Charakteristiky P-V a V-A celého systému 4×20 W panelov sú totožné, len štvornásobne zväčšené.

1.1.1 Dáta slnečnej radiácie pre potreby simulačného modelu

Pre účely tejto práce bola použitá databáza meteorologických údajov NREL, konkrétne National Solar Radiation Database (NSRD) z roku 2017. Vybraná lokalita pre dáta je určená súradnicami 48.891094, 21.715078. Tieto databázy, ktoré sa medziročne líšia len minimálne, sú získavané buď satelitnými snímkami, alebo priamym meraním na meteorologických staniciach. V databázach sú dostupné údaje o globálnej horizontálnej radiácii (GHI z angl. Global Horizontal Irradiance), priamej normálnej radiácii (DNI z angl. Direct Normal Irradiance), difúznej horizontálnej radiácii (DHI z angl. Diffusion Horizontal Irradiance), rýchlosti vetra a teplote vzduchu.

Na **Obr. 2** je zobrazený ročný priebeh priamej slnečnej radiácie už na naklonenú plochu FV panela. Optimálny uhol sklonu 35° , bol zvolený pre danú geografickú šírku. Dáta boli zaznamenané v polhodinových intervaloch.

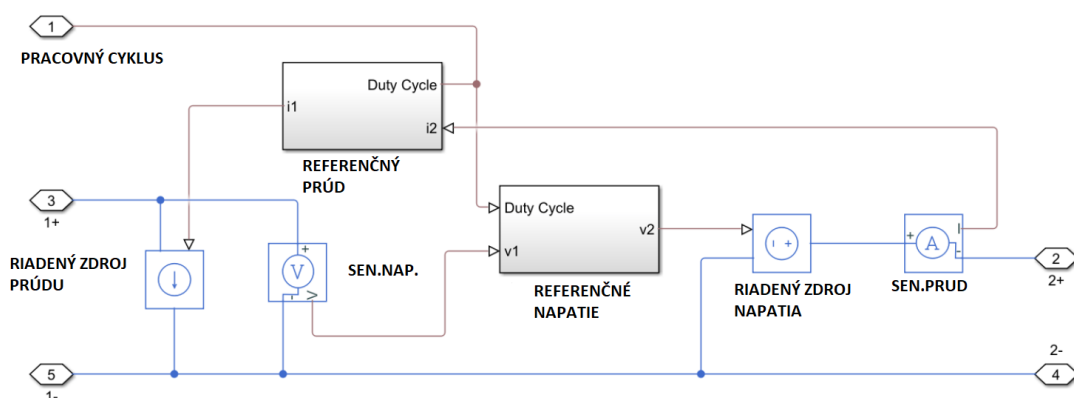


Obr. 2 Ročný priebeh radiácie

Na zohľadnenie vplyvu oblačnosti na radiáciu bolo potrebné namerané dáta aproximovať vhodným náhradným modelom. Dáta GHI, ovplyvnené oblačnosťou, majú nespojitý charakter a sú merané v dlhých intervaloch, čo ich robí nevhodnými pre priamy vstup do simulačného modelu. Dáta GHI po aproximácii boli získané pomocou nástroja Curve Fitting Toolbox v Matlabe. Denný a mesačný priebeh radiácie je modelovaný polynomiálnymi funkciami, konkrétne 4. rádu pre denné dáta a 7. rádu pre mesačné dáta. Na základe získaných informácií možno presne simulovať priebeh slnečného žiarenia počas ktoréhokoľvek dňa v roku.

1.2 Meniče DC – DC

V simulačnom modeli sú všetky DC-DC meniče znázornené ako riadený prevodník s priemernou hodnotou. Tento blok môže fungovať ako „buck“ (znižujúci), „boost“ (zvyšujúci) alebo „buck-boost“ (znižujúci/zvyšujúci) menič. Riadiacim vstupom pre menič je pracovný cyklus (strieda) z PWM generátora, ktorý pracuje na určitej spínacej frekvencii. Prevodník obsahuje riadené zdroje prúdu a napätia. Prúdové a napäťové senzory slúžia ako referenčné vstupy pre riadenie konverzie elektrickej energie. Toto riešenie eliminuje potrebu detailného modelovania spínacích prvkov (ako sú IGBT a MOSFET tranzistory), ktoré by výrazne zvýšili výpočtovú náročnosť simulácie vďaka ich vysokým spínacím frekvenciám. Keďže sa naša štúdia systému na výrobu vodíka nezameriava na krátkodobé prechodné javy, nie je potrebný komplexnejší model DC-DC meniča so spínacími prvkami. Blok riadeného DC prevodníka s podsystémami je zobrazený na **Obr. 3**.



Obr. 3 Model DC-DC meniča v prostredí Simulink-Simscape

1.3 Batériové úložisko

V praktických aplikáciách sa na skladovanie energie využívajú rôzne typy batériových úložísk, ktoré môžu obsahovať batérie typu LiFePO₄, Li-Po, zaplavené batérie alebo gélové batérie. Z elektrického hľadiska je kladený dôraz na kapacitné vlastnosti úložiska, ktoré by mali prevyšovať tie výkonové, čo znamená, že energetická hustota by mala byť vyššia ako výkonová. Pre účely zmenšeného modelu bola pozornosť venovaná Li-ion článkom, ktoré sú ľahko implementovateľné do systému a sú široko dostupné, čo umožňuje ich využitie v reálnom, zmenšenom modeli. Návrh batériového úložiska je založený na požiadavkách na nabíjanie a vybíjanie. Batéria je nabíjaná výhradne z FV zdroja. Pre tento zdroj je stanovený maximálny výkon (P_{FV}) 80 W pri prúde 4,32 A a napätí 18,6 V. Úložisko musí byť taktiež na podobnej potenciálovej úrovni ako FV systém (5 – 18 V) a elektrolyzér (8 – 12 V). Jediným spotrebičom v systéme je elektrolyzér s príkonom 23 W. Vzhľadom na to, že nabíjacie a vybíjacie prúdy nie sú dominantnými faktormi, návrh a výber článku sú primárne zamerané na zabezpečenie dostatočnej kapacity, vysoký počet nabíjacích/vybíjacích cyklov a široký rozsah pracovných teplôt.

V **Tab. 2** nižšie sú porovnané kľúčové parametre Li-ion článkov pre špecifikovanú aplikáciu. Ako najvhodnejší článok bol vyhodnotený Panasonic NCR186650GA vďaka jeho vynikajúcim parametrom, ako sú dostatočné vybíjacie a nabíjacie prúdy a najväčšia kapacita. Určitou nevýhodou je však menší rozsah prevádzkových teplôt, čo by mohlo ovplyvniť funkčnosť pri autonómnej vonkajšej prevádzke systému. Z tohto vybraného článku bolo zostavené batériové úložisko.

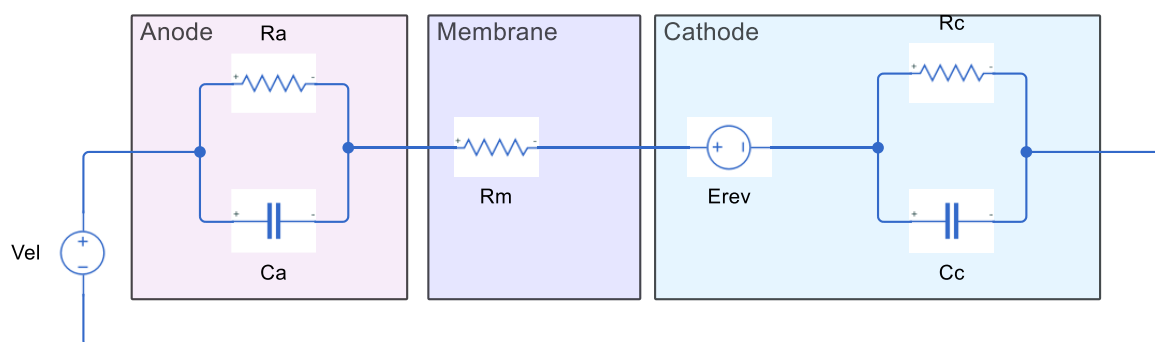
Tab. 2 Parametre Li-ion článkov

	Panasonic 18650BD	Samsung INR21700	Panasonic NCR18650GA	Samsung INR35E	
Premenná	Hodnoty				Jednotky
C nabíjanie	0,5	1,000	1,5	0,5	h^{-1}
C vybíjanie	2,3	2	2	1,000	h^{-1}
Kapacita	2,980	5	3,450	3,350	Ah
Nom. napätie	3,600	3,63	3,600	3,600	V
Hmotnosť	0,048	0,069	0,048	0,048	kg
Životnosť	2000	1000	1500	1500	cykly
Pracovná teplota	-20 až +60	20 až +80	0 až +60	-10 až +60	°C
Ener. hustota	217	267	224,000	215	Wh/kg

1.4 PEMEL systém

Predchádzajúci výskum PEMEL ukázal, že elektrochemické procesy vo vnútornej štruktúre vykazujú dynamické (pri dynamickej prevádzke) aj statické (pri ustálenej prevádzke) charakteristiky. Tento jav, spojený s rôznymi režimami prevádzky, je známy ako efekt dvojvrstvého náboja. Medzi elektródami a elektrolytom sa vytvára vrstva, ktorá dokáže uchovávať elektrický náboj, resp. energiu – tzv. dvojvrstvový náboj, ktorý sa správa podobne ako kondenzátor. Akumuláciou nábojov vzniká elektrické napätie zodpovedajúce aktivačnému napätiu anódy a katódy. Z tohto dôvodu pri náhlej zmene prúdu v PEMEL dochádza k oneskoreniu, kým sa zmena prejaví – práve v dôsledku pôsobenia aktivačného napätia. Naopak, ohmické napätie reaguje na zmenu prúdu okamžite. Na základe tejto analýzy správania je možné vytvoriť ekvivalentný elektrický obvod, ktorý opisuje aktivačné napätie na katóde a anóde.

Model obsahuje dve paralelné spojenia, R_a/C_a a R_c/C_c , ktoré predstavujú anódu a katódu. Keď sa na vstup PEMEL aplikuje skokový prúd, napätie článku V_{el} , vykazuje primárne a sekundárne prechodné stavy. Primárny stav vzniká v anóde, kde je privádzaná voda. V tomto stave dochádza k rýchlym dynamickým zmenám, konkrétne k rýchlemu zvýšeniu napätia elektrolyzéra V_{el} , spôsobenému zvýšením aktivačného napätia anódy V_{aa} . [37]



Obr. 4 Ekvivalentný elektrický obvod PEMEL [38]

Simulačný model elektrolyzéra vychádza zo zariadenia Horizon Hydrofil Pro FCH-020 (**Tab. 3**), určeného na produkciu vodíka pomocou PEM elektrolyzy. Vstupmi sú deionizovaná voda a elektrická energia, ideálne z

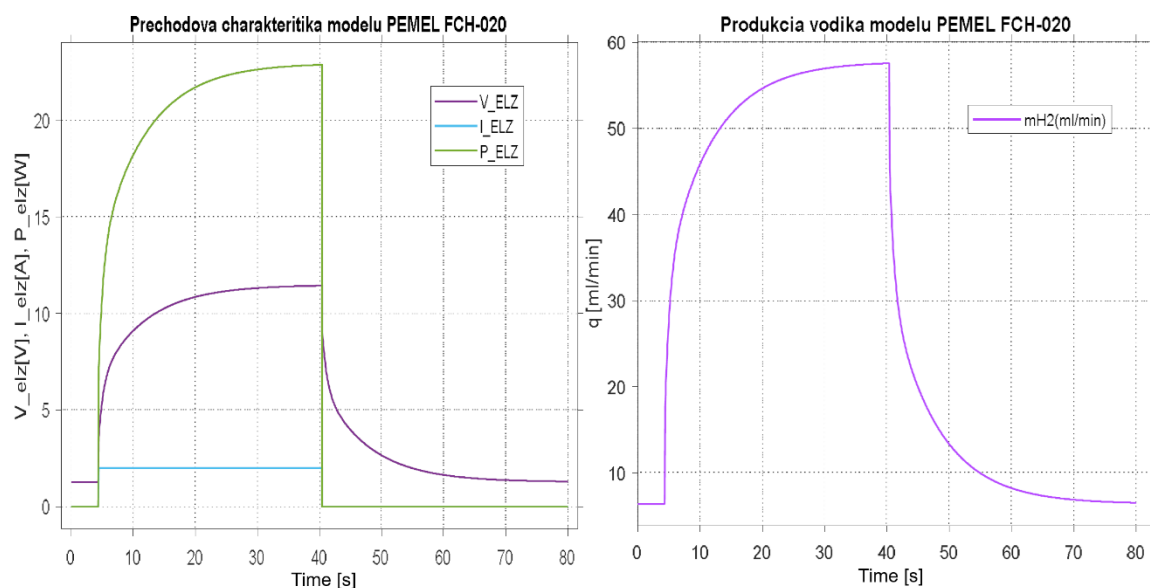
obnoviteľných zdrojov. Vyrobený vodík sa ukladá do metalhydridovej nádrže typu AB5 s kapacitou 10 litrov, pracovným tlakom do 3 MPa a rozsahom teplôt od 0 do 55 °C. Model umožňuje analýzu správania elektrolyzéra a jeho integráciu do systémov s OZE.

Tab. 3 Parametre elektrolyzéra PEMEL-FCH-020 [40]

Typ	PEMEL-FCH-020	
Výkon	23	W
Vstupné napätie (DC)	10-19	V
Spotreba vody	20	ml/hod
Výstupný tlak	3,0	MPa
Produkcia H ₂	3000	ml/hod

PEMEL predstavuje systém, v ktorom prebiehajú aj chemické reakcie, ktoré však nie je nutné detailne modelovať pre účely energetickej analýzy. Komplexné zariadenie PEMEL FCH-020, zahŕňajúce subsystémy pre preplachovanie, predhrievanie, zvlhčovanie a dávkovanie vody do membrány, je v tomto prípade nahradené zjednodušeným modelom založeným na ekvivalentnom elektrickom obvode.

Na **Obr. 5** vľavo je znázornená prechodová charakteristika PEM elektrolyzéra (PEMEL) pri nominálnom prúde 2 A. V dôsledku dynamických javov na anóde a katóde dochádza k oneskorenému nábehu napätia a výkonu. Výkon systému PEMEL FCH-020 sa po čase ustáli na hodnote 23 W, čo zodpovedá reálnemu zariadeniu. Po odpojení napájania sa vplyvom kapacitných vlastností štruktúry PEMEL prejaví postupný pokles napätia a výkonu. Miera produkcie vodíka závisí priamo od prúdu a tiež vykazuje oneskorený nábeh, čím verne kopíruje správanie reálneho systému. Simulovaný model dosahuje produkciu vodíka na úrovni 50 ml/min (3000 ml/h) pri tlaku 30 bar a teplote 40 °C, čo potvrdzuje jeho spoľahlivosť. [37,39]



Obr. 5 Prechodová charakteristika FCH-020 [40]

Dynamika systému závisí od hodnôt kondenzátorov $C_a = 0.5 \text{ F}$ a $C_c = 3 \text{ F}$ v ekvivalentnom obvode, ako aj od celkového odporu $R_{tot} = 5.1 \text{ } \Omega$. Časový nábeh modelovaného PEMEL na dosiahnutie pracovného výkonu trvá približne 30 sekúnd.

1.5 Riadenie energetických tokov FV systému

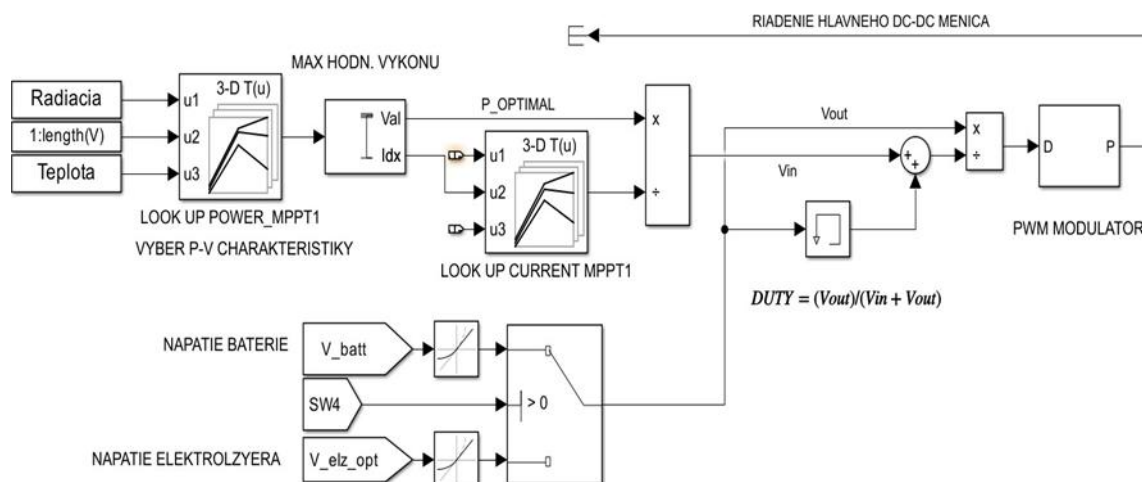
FV systém, ktorý je zdrojom s kolísavým výkonom v rozsahu 0 až 80 W a premenlivým prúdom a napätím, predstavuje výzvu pre riadenie. Je to preto, že elektrolyzér, ako kľúčová súčasť systému, musí byť prevádzkovaný pri konštantnej úrovni prúdu a napätia.

Ďalší problém sa vyskytuje pri simultánnom odovzdávaní vyprodukovanej energie z FV systému do batérie a elektrolyzéra. Zatiaľ čo batéria pracuje s variabilným rozsahom napätia a prúdu, elektrolyzér vyžaduje po svojom nábehu stabilné prevádzkové podmienky. Okrem toho je FV systém „mäkkým“ zdrojom, čo znamená, že jeho prevádzka je ovplyvňovaná pripojenou záťažou. Napríklad, v dňoch s maximálnym slnečným žiarením, keď FV systém produkuje plných 80 W a batéria je už nabitá, je nevyhnutné znížiť produkovanú energiu na 23 W, čo zodpovedá spotrebe elektrolyzéra. Z tohto dôvodu je zásadný návrh efektívneho riadenia energetických tokov v systéme.

1.5.1 Look-Up Table - Matematický model riadenia FV systému

Matematický model bol navrhnutý na základe definovaného rozsahu vstupnej radiácie (0 až 1000 W/m²), teploty (-10 až 80 °C) a výstupného napätia (0 až 23 V). Pomocou tohto modelu sú vypočítavané hodnoty napätia a prúdu, pri ktorých je dosahovaný buď maximálny výkon, alebo výkon potrebný pre záťaž.

Riadiaci obvod je znázornený na **Obr. 6**. Do regulátora je privedená priemerná hodnota radiácie a teploty, pri ktorej FV systém pracuje. Pomocou n -rozmernej prehľadávacej tabuľky POWER je vybraná dvojrozmerná P-V charakteristika pre aktuálnu radiáciu a teplotu. Ideálna P-V charakteristika má iba jedno globálne maximum, t.j. jednu maximálnu hodnotu výkonu. Tejto hodnote je pomocou indexu priradená hodnota prúdu z tabuľky CURRENT, ktorá obsahuje V-A charakteristiky vypočítavané na základe radiácie, teploty a rozsahu napätia. Optimálna hodnota výstupného napätia V_{in} FV systému pre dané podmienky je vypočítaná podielom maximálneho výkonu a zodpovedajúceho prúdu. Následne je vypočítaný pracovný cyklus podľa vzťahu na **Obr. 6** pre „buck-boost“ menič. Pracovným cyklom je ovládaný PWM modulátor, ktorého výstupom je riadiaci signál spínacích prvkov hlavného DC-DC meniča.



Obr. 6 Matlab-Simulink Look-Up Table matematický model riadenia výkonu FV systému

1.5.2 Logika riadenia energetických tokov FV systému

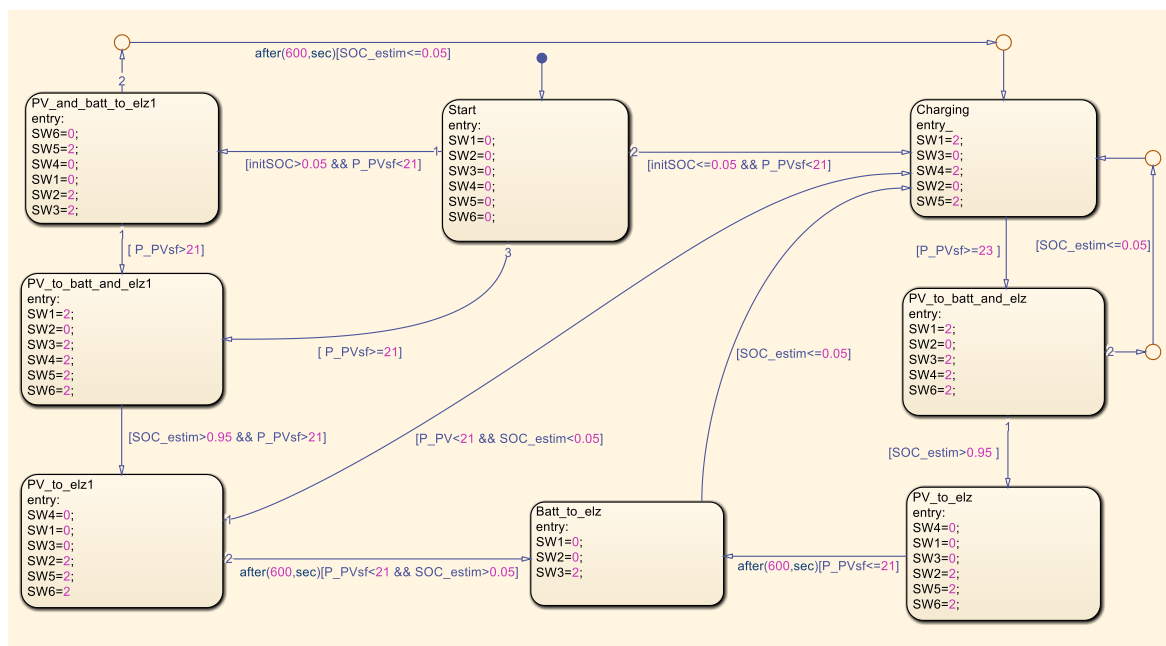
Energetické toky z fotovoltického systému do batérie a elektrolyzéra sú riadené Jednotkou distribúcie energie (PDU). V prípade 80 W simulačného modelu je PDU vybavená tromi relé (RELÉ1 až RELÉ3). Relé sú zapojené tak, aby bolo možné zabezpečiť všetky kombinácie prevádzkového cyklu systému, vrátane:

- Nabíjania batérie z FV systému.
- Súčasného nabíjania batérie a napájania ELZ z FV systému.
- Napájania ELZ výhradne z FV systému.
- Súčasného napájania ELZ z FV systému a batérie.
- Napájania ELZ výhradne z batérie.

Riadiaci signál pre ovládanie relé je v simulačnom modeli generovaný riadiacou jednotkou systému ako prahová hodnota napätia (U_{thld}) v rozsahu 0 až 5 V, čo zodpovedá reálnemu systému. Vyhodnocovacia logika je v simulačnom modeli implementovaná pomocou grafického jazyka Stateflow. V reálnom modeli bol riadiaci systém vyvinutý v Simulinku transformovaný do jazyka C/C++ pomocou nástrojov Simulink Coder a Embedded Coder, čo zabezpečuje vysokú interoperabilitu medzi vývojom riadenia a jeho implementáciou v mikro-počítačových riadiacich systémoch.

Ako vstupné premenné do Stateflow sú použité počiatočné nabitie batérie ($initSOC$), optimálna hodnota výkonu FV systému (P_{PVsf}) a vypočítaná hodnota nabitia batérie (SOC_{estim}). Riadiaci vývojový diagram je znázornený na **Obr. 7**.

Riadenie sa začína v bloku Start, kde sú všetky riadiace napätia spínacích prvkov SW1 až 7 nulové. Systém môže byť spustený buď s úplne vybitou, alebo čiastočne nabitou batériou. Ak je batéria úplne vybitá a výkon FV systému je pod prahom potrebným pre spustenie elektrolyzéra, spustí sa proces nabíjania. Ak je batéria nabitá, energia z batérie a FV systému je smerovaná do ELZ. V prípade, že výkon FV systému prevyšuje spotrebu ELZ, batéria je nabíjaná a ELZ je napájaný.



Obr. 7 Logika riadenia energetických tokov systému

Keď je batéria nabitá a výkon FV systému dostatočný, ELZ je napájaný priamo. Ak výkon FV systému klesne pod hodnotu potrebnú pre napájanie ELZ, napájanie je prevzaté plne nabitou batériou. Rovnaký algoritmus sa uplatňuje aj v prípade, ak je batéria vybitá.

Vzhľadom na komplexnosť systému s mnohými premennými je výzvou ošetriť všetky možné stavové kombinácie. Primárnym cieľom riadenia je však zabezpečiť nepretržité napájanie ELZ a tým stabilnú produkciu vodíka čo najdlhšie.

1.5.3 Výsledky simulácií navrhovaného systému

Na optimalizáciu času simulácie a overenie správnosti výsledkov bolo použité rozhranie Solver Profiler v Simulinku. Počas simulácie bol použitý variabilný časový krok. Hoci toto dynamické nastavenie kroku (zväčšovanie pri pomalých zmenách a zmenšovanie pri rýchlych zmenách premenných) zlepšuje presnosť, najmä pri diskontinuitách, kde sú potrebné malé kroky, vedie to k nadmerným časom simulácie.

Rozhranie Solver Profiler rieši tento problém pomocou detekcie nulových prechodov (Zero-crossing detection). Táto technika umožňuje presne lokalizovať diskontinuity bez potreby extrémne malých časových krokov, čím sa skracuje čas simulácie.

Ďalej boli na základe štatistických kritérií (ako napríklad reset solvera, kontrola chýb, Newtonova iterácia, nekonečný stav a výnimka Newtonovej iterácie) identifikované problémové prvky systému. Tieto prvky, kde nedochádzalo ku konvergencii, ale k numerickým chybám, spomaľovaniu simulácie a nesprávnym výsledkom, boli následne analyzované a upravené, aby sa predišlo opakovaným numerickým chybám.

Simulačná schéma je tiež chránená proti vzniku algebraických slučiek. Algebraická slučka vzniká, keď signálová slučka obsahuje len bloky s priamou priechodnosťou. Priama priechodnosť znamená, že na výpočet výstupu bloku v aktuálnom časovom kroku je potrebná hodnota jeho vstupného signálu. Takáto závislosť medzi vstupmi a výstupmi vytvára „kruhovú“ závislosť.

Produkcia energie systémom je výrazne ovplyvňovaná meniacim sa slnečným žiarením v priebehu roka. Pri nízkej radiácii, ak je batéria nabitá, 27 litrov vodíka sa vyprodukuje za 48 hodín. V takomto prípade

dosahuje maximálny výkon len 10 % celkového výkonu FV panelov. Ak je batéria vybitá, v rovnakom časovom rámci žiadny vodík nie je vygenerovaný.

Pri priemernej radiácii je produkcia vodíka 98, respektíve 76 litrov za 48 hodín. Prebytočná energia je uložená v batérii a následne spotrebovaná. Za podmienok maximálneho slnečného žiarenia môže systém vyprodukovať 125, respektíve 112 litrov vodíka za 48 hodín. Dosiahnuté objemy produkcie vodíka a celková energetická bilancia sú zhrnuté v **Tab. 4**.

Riadok označený ako P_{FVmax} predstavuje najvyšší výkon FV systému dosiahnutý počas simulácie. Ostatné riadky sumarizujú množstvo energie, ktoré bolo v systéme vyrobené, spotrebované a uskladnené. Je dôležité poznamenať, že pri maximálnej radiácii je zaznamenaná najnižšia účinnosť (riadok η_{min} v **Tab. 4**), a to z dôvodu obmedzenia celkového výkonu systému.

Presné informácie o množstve vyprodukovanej energie počas roka boli získané prostredníctvom simulačného návrhu. Na základe týchto dát je možné vyhodnotiť predpokladané množstvo vyrobeného vodíka. Taktiež je možné posúdiť vhodnosť navrhnutého Li-ion batériového úložiska, ako aj optimálny počet a usporiadanie solárnych panelov.

Tab. 4 Porovnanie výsledkov simulovaného systému pri rozličných scenároch

	Nízka radiácia		Priemerná radiácia		Maximálna radiácia		Jednotky
	95%	5%	95%	5%	95%	5%	
mH2	27	0	98	76	125	112	l/48h
P_{FVmax}	8,64	8,64	34	34	72	71	W
Wh_{FV}	167,2	167,2	409	410	587	591	Wh
Wh_{batt_in}	164,0	164,0	58	59	226	225	Wh
Wh_{bat_out}	162,8	0	258	57	424	223	Wh
Wh_{elz}	160	0	551	408	785	589	Wh
η_{min}	95	95	90	93	33	33	%

2 Modelovanie palivového článku typu PEM

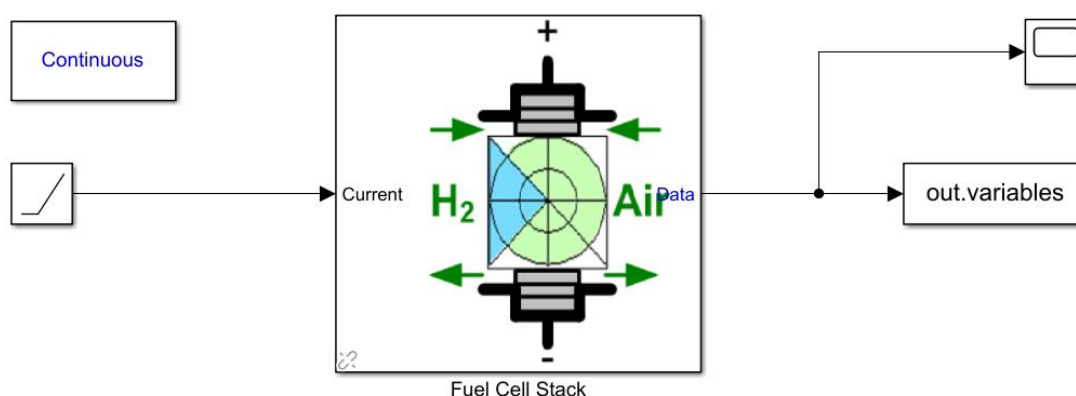
V tejto kapitole sa podrobne analyzujú základné princípy fyzikálneho a predovšetkým matematicko-simulačného modelu vzduchom chladeného palivového článku s polymérovou elektrolytickou membránou (PEM). Jej cieľom je poskytnúť dôkladný pohľad na špecifické vlastnosti a správanie tohto systému, ako aj na jeho matematicko-simulačný model, ktorý je využívaný na simuláciu a predikciu správania sa v rôznych podmienkach a nastaveniach.

V úvodných častiach sa pozornosť venuje fyzikálnemu modelu systému palivového článku, základným komponentom a prenosom medzi nimi. Následne je rozpracovaný matematicko-simulačný model, ktorý opisuje fyzikálne procesy prebiehajúce v palivovom článku, ako aj ich simuláciu.

Kapitola je považovaná za kľúčovú súčasť celej práce, nakoľko poskytuje teoretický základ a pochopenie fungovania PEM palivových článkov, ako aj techniky a metódy používané na ich analýzu a modelovanie.

2.1 Matematicko-simulačný model palivového článku typu PEM

Pre účely modelu bol použitý a upravený blok palivového článku zo Simscape Electrical v prostredí Matlab Simulink (**Obr. 8**). Táto modifikácia umožnila bloku pracovať s Matlab Workspace.



Obr. 8 Horná vrstva modelu palivového článku

Na základe vstupných parametrov, ako sú hodnoty prúdu a technické špecifikácie palivového článku, môžu byť vypočítané hodnoty napätia, spotreby, využitia reaktantov a prietoku. Tieto výpočty sú možné aj pri štandardných podmienkach (0 °C a 1 atm).

Simulačný model ponúka výber zo štyroch variantov: spojitý-zjednodušený, diskretný-zjednodušený, spojitý-detailnejší a diskretný-detailnejší model. Zjednodušený model reprezentuje palivový článok, ktorý pracuje pri nominálnych podmienkach teploty a tlaku. Parametre ekvivalentného obvodu môžu byť získané z polarizačnej krivky.

Pre výpočet týchto parametrov postačuje zadať do masky hodnoty napätia pri 0 A, 1 A, nominálnom prúde (pričom je možné zvoliť aj iný špecifický bod z technickej dokumentácie pre čo najpresnejší opis polarizačnej krivky) a maximálnom (špičkovom) prúde. Hoci ekvivalentný obvod zostáva identický s tým pri

zjednodušenom modeli, počas simulácie sú dynamicky modifikované parametre. Týka sa to napríklad napätia naprázdno (pri otvorenom vonkajšom obvode), zmeny prúdu a sklonu Tafelovej krivky. [42]

V tejto podkapitole je podrobnejšie popísané fungovanie spojitého simulačného modelu. Technické parametre palivového článku sú vkladané do masky bloku „Fuel Cell Stack“. Je možné zvoliť dodatočné dynamické vstupy a tiež špecifikovať dynamiku palivového článku.

Bol simulovaný palivový článok typu H-500, ktorého parametre sú uvedené v **Tab. 5**. Ak je zadáný maximálny prietok vzduchu, nominálny prietok môže byť vypočítaný za predpokladu konštantnej spotreby kyslíka pri akomkoľvek zaťažení.

Tab. 5 Vstupné parametre FC v bloku simulácie

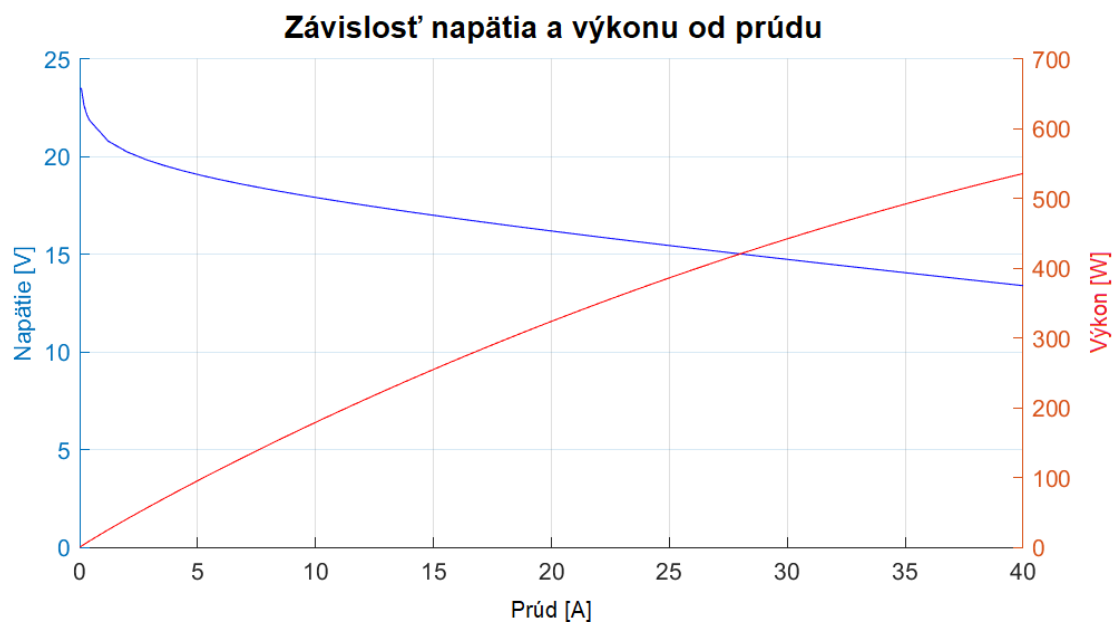
	Vstupné hodnoty	Označenie v modeli
Napätie pri 0 [A] a 1 [A]	23.5 V / 21 V	E_{oc}
Nominálny operačný bod (prúd/napätie)	20 A / 16.2 V	NomVI
Maximálny operačný bod (prúd/napätie)	40 A / 13.4 V	EndVI
Počet článkov	24	N_c
Nominálna účinnosť (efektivita) zväzku	40 %	n
Operačná teplota zväzku	55 °C	T_{Op}
Nominálny prietok vzduchu	19.7 l/min	AirFr
Nominálny tlak privádzaného paliva a vzduchu	H ₂ = 1.5 bar / O ₂ = 1 bar	SuppPress
Nominálne zloženie paliva, vzduchu a vodnej pary	H ₂ = 99.995 % / O ₂ = 21 % / H ₂ O = 1 %	Comp

Na začiatku simulácie sú premenné z **Tab. 5** spracované funkciou „FuelCellInit()“. Predpokladá sa, že funkčnosť tejto funkcie je možné odvodiť z jej vstupných a výstupných hodnôt. Výstupom z funkcie sú všetky premenné s predponou FC.

Pri tomto modeli sú prijaté nasledujúce zjednodušenia:

- Predpoklad ideálnych plynov.
- Stabilná teplota na katóde a anóde, rovnajúca sa teplote celého článku, je zabezpečená chladiacim systémom.
- Dostatočná úroveň vlhkosti v bunkách je udržiavaná systémom na samo-zvlhčovanie bez ohľadu na záťaž.
- Pokles tlaku v prietokových kanáloch je zanedbaný.
- Odpor článku je považovaný za konštantný pri všetkých podmienkach.
- Dynamika chemických reakcií, spôsobená zmenami parciálneho tlaku reaktantov v bunke, nie je zohľadnená.
- Vplyv teploty a vlhkosti membrány na vnútorný odpor sa neuvažuje.
- Prietok plynov alebo vody cez membránu nie je zahrnutý do modelu.

2.2 Výstup matematicko-simulačný model palivového článku typu PEM



Obr. 9 Volt-ampérová (polarizačná) a výkonová charakteristika matematicko-simulačného modelu

Výsledný matematicko-simulačný model PEM FC poskytol volt-ampérovú a výkonovú charakteristiky, ktoré sú zobrazené na **Obr. 9**. Ďalšie výkonové a fyzikálne parametre, uvedené v **Tab. 6**, boli vypočítané modelom za predpokladu konštantných vstupov v zmysle Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.. Spotreba a prietok vzduchu sú modelom predpokladané len pre reakcie. Vzduchom chladené PEM FC systémy v praxi, najmä tie do 5000 W, však vyžadujú výrazne väčšie množstvo vzduchu, keďže je používaný aj na chladenie článku.

Tab. 6 Výstupné vypočítané parametre simulácie modelu

Výkon – pri 20 A (nominálny)	324 W
Výkon pri 40 A (maximálny)	536 W
Využitie vodíka	72,47 %
Využitie kyslíka	50,02 %
Spotreba paliva	3,344 l/min
Spotreba vzduchu	7,96 l/min
Zmena prúdu	0,073375 A
Prietok paliva – Nominálny / Maximálny	3,695 / 7,39 l/min
Prietok vzduchu – Nominálny / Maximálny	19,12 / 38,24 l/min

3 Overovanie matematicko-simulačných modelov meraním reálnych zariadení

Kapitola opisuje proces verifikácie matematicko-simulačných modelov. Táto verifikácia je uskutočňovaná pomocou meraní získaných z reálnych zariadení. Presnosť a spoľahlivosť modelov tak môžu byť overené porovnaním ich výstupov s dátami nameranými v skutočnom prostredí. Týmto spôsobom je zabezpečená vysoká miera dôveryhodnosti simulačných nástrojov, ktoré sú následne používané na predikciu správania systémov a optimalizáciu ich výkonu. Je kľúčové, aby modely boli overené voči reálnym podmienkam, čím je minimalizované riziko chybných predpovedí a nesprávnych rozhodnutí.

3.1 Zostavenie a meranie zmenšeného modelu FV systému na výrobu zeleného vodíka

Na nasledujúcich stranách je popísaný návrh a zostavenie zmenšeného modelu na výrobu zeleného vodíka s výstupným výkonom 80 W. Systém je schopný smerovať energiu zo štyroch FV panelov buď do Li-ion batériového úložiska, alebo priamo do samostatného systému elektrolyzéra Horizon Hydrofil Pro. Princíp činnosti a riadenie sú identické so simulačným návrhom.

Zloženie riadiacej a ochrannej vrstvy systému:

- riadiacia jednotka Arduino Mega 2560
- výkonové meniče XL6009
- prúdové snímače ACS712
- napäťové snímače
- snímače teploty
- spínacie relé prvky
- ochranné diódy
- tavné poistky

Batériové úložisko, ktorého parametre sú podrobne uvedené v **1.3**, je tvorené ôsmimi článkami Panasonic 18650GA s nominálnou kapacitou 27,6 Ah (100 Wh) a výstupným napätím v rozsahu 5 až 8,4 V. Systém je tiež vybavený predprípravou pre pripojenie palivového článku prostredníctvom Arduino.

Možnosť autonómnej prevádzky je zaistená komunikačnou jednotkou NodeMCU. Táto jednotka umožňuje pripojenie systému k internetu prostredníctvom Wi-Fi a zdieľanie informácií o stave systému.

Kladný pól FV panelov je pripojený k usmerňovacím diódam. Paralelné zapojenie je rozdelené do dvoch skupín, kde sú merané napätie a prúd, čo zabezpečuje rovnomerné rozloženie prúdov pri rozdielnej radiácii. Výstupné napätie FV panelov v rozsahu 0 až 22 V je pomocou „Buck-Boost“ meničov stabilizované na 8,4 V. Na výstupe FV systému sú opäť merané napätie a prúd. Vyprodukovaná energia je pomocou relé R1-3 smerovaná do batérie alebo elektrolyzéra v závislosti od stavu systému.

Možnosti riadenia energetických tokov:

- z batérie do elektrolyzéra
- z FV a batérie do elektrolyzéra
- z FV do batéria a elektrolyzér

Vstupné napätie elektrolyzéra je stabilizované „Boost“ meničom na 10 V. V prípade autonómnej prevádzky sú riadiace jednotky systému napájané z batérie. Aktuálny stav systému je zobrazovaný na LED displeji prostredníctvom zbernice I²C. Analógové vstupy sú spracované v riadiacej jednotke Arduino Mega, ktorá pomocou digitálnych výstupov riadi toky energie. Spracované dáta sú v prípade autonómnej prevádzky odosielané sériovou komunikáciou do NodeMCU a následne na Cloud. Schéma je zjednodušená o vodiče s napätím 5 V, ktoré slúžia na napájanie snímačov napätia a prúdu. Systém môže byť riadený a vyhodnocovaný aj z externého počítača pripojeným cez USB rozhrania.

3.1.1 Softvérový návrh merania

Následne boli implementované softvérové komponenty, ktoré zahŕňajú merací, riadiaci a komunikačný modul. Softvér bol vytvorený s cieľom zabezpečiť presné získavanie dát, efektívne riadenie procesov a spoľahlivú komunikáciu v rámci systému.

Popri zostavení programu bola pozornosť venovaná aj metodikám filtrovania a spracovania nameraných dát, aby sa dosiahla maximálna presnosť a relevantnosť získaných informácií. Detailne sú predstavené aj výsledky testovania zmenšeného modelu s výkonom 80 W, pri ktorom bola overená funkčnosť a stabilita celého softvérového riešenia. Tieto výsledky poskytnú komplexný pohľad na výkonnosť a spoľahlivosť vyvinutého systému.

3.1.2 Testovacie meranie FV modelu s nízkym výstupným výkonom

Zostavený systém počas testovania je znázornený na **Obr. 10**. Na účely ovládania a grafického vyhodnocovania bol použitý počítač namiesto autonómnej prevádzky. K systému sú ďalej pripojené štyri fotovoltické panely.



Obr. 10 Testovací model s nízkym výstupným výkonom

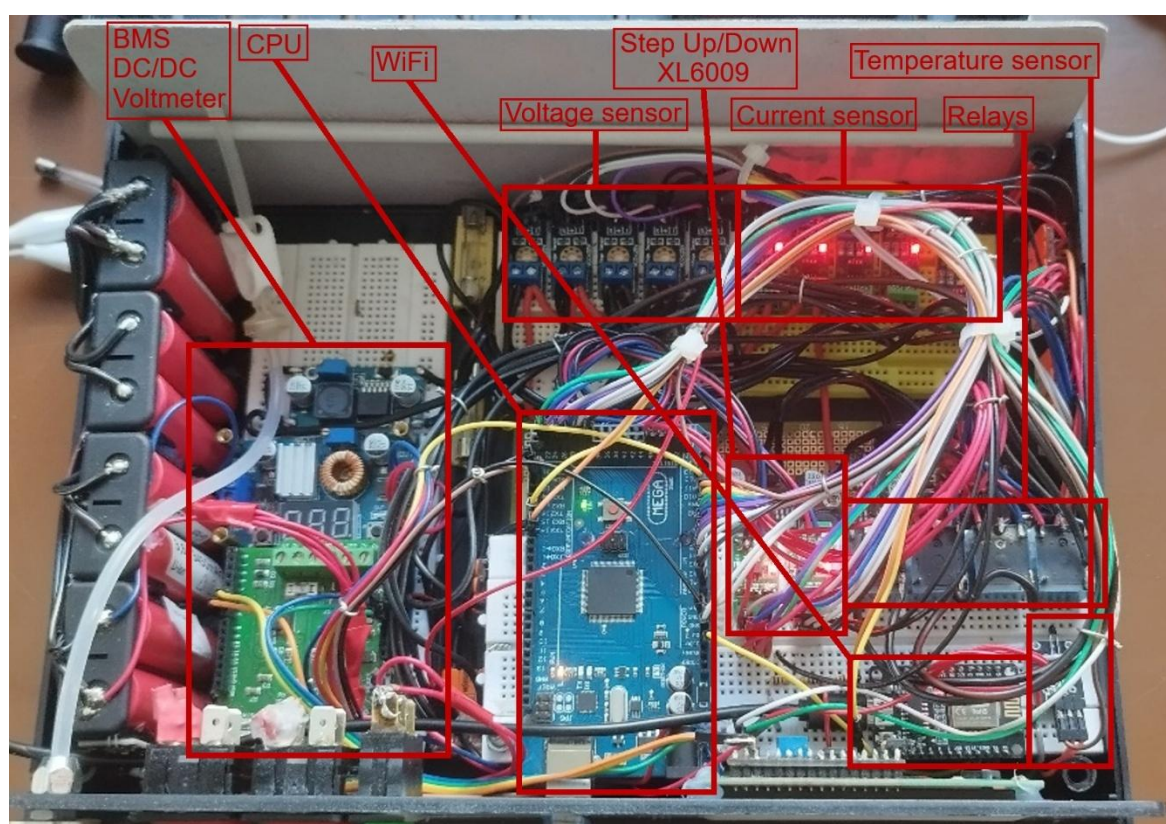
Na **Obr. 11** je podrobne znázornené vnútorné usporiadanie a konštrukcia zostrojeného prístroja. V ľavej časti tohto usporiadania je umiestnených osem lítiovo-iónových batérií, ktoré slúžia nielen na akumuláciu energie získanej z fotovoltického systému, ale zabezpečujú aj napájanie riadiacich obvodov celého systému.

Ďalej je v rámci systému integrovaná riadiaca jednotka, ktorá je pripravená na prípadnú implementáciu palivového článku, čím sa rozširuje potenciál zariadenia. Centrálnym riadiacim prvkom je hlavná riadiaca jednotka Arduino Mega (**Obr. 11** „CPU“), ktorá spracováva a koordinuje všetky operácie.

Na pravej strane sú nainštalované spínacie relé, ktoré umožňujú ovládať pripojené komponenty, ďalej komunikačná jednotka NodeMCU pre bezdrôtovú komunikáciu a výstupný LCD displej, na ktorom sú zobrazované dôležité informácie a stav systému.

V zadnej časti zariadenia je rozmiestnených desať snímačov napätia a prúdu, ktoré monitorujú elektrické parametre a zabezpečujú presné merania. Pod riadiacou jednotkou Arduino sú strategicky umiestnené výkonné meniče, usmerňovacie diódy a poistky, ktoré sú nevyhnutné pre bezpečnú a efektívnu distribúciu energie a ochranu obvodov.

Celkovo je štruktúra zariadenia navrhnutá tak, aby bola zabezpečená optimálna funkčnosť, modularita a jednoduchá údržba všetkých komponentov.

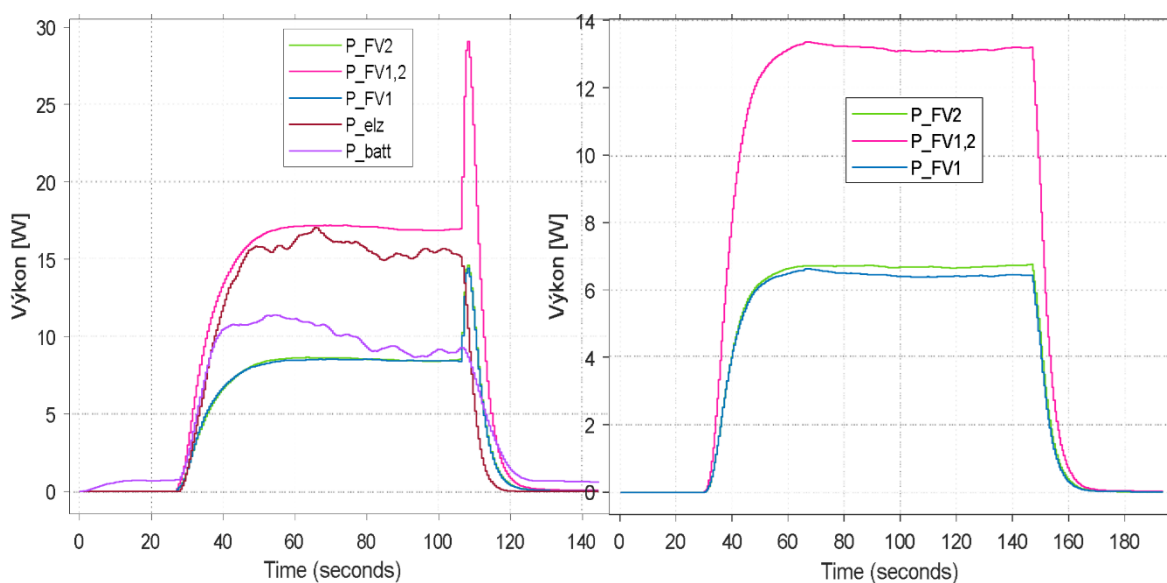


Obr. 11 Rozloženie komponentov zmenšeného modelu

Výsledky merania

Pre lepšiu prehľadnosť sú zobrazené len základné parametre. Optimálny výkon FV nie je dosiahnutý, pretože nie je prítomný algoritmus MPPT. Je dôležité poznamenať, že tento zmenšený model slúžil predovšetkým na overenie správania fotovoltických panelov. MPPT algoritmus by optimalizoval výkon fotovoltického systému sledovaním bodu maximálneho výkonu, čo by viedlo k vyššej účinnosti. Napriek absencii MPPT je systémom odovzdávaný výkon 17 W do batérie a elektrolyzéra.

Na **Obr. 12** vľavo sú znázornené priebehy výkonu batérie, elektrolyzéra a fotovoltického systému. Na **Obr. 12** vpravo je zobrazený priebeh výkonu FV systému pri napájaní elektrolyzéra bez batérie.



Obr. 12 Meranie reálnych veličín modelu s nízkym výstupným výkonom

Výkonnostné výkyvy záťaže a špičky, ktoré sú viditeľné na ľavom grafe, sú zapríčinené konfiguráciou energetickej úrovne systému a úrovne citlivosti, prípadne nastavením citlivosti spínacích prvkov. Keďže je testovaný systém ostrovného typu s nízkymi výstupnými výkonmi (maximálna spotreba elektrolyzéra dosahuje 23 W a výkon FV systému pripojeného k zmenšenému modelu je 80 W), aj malé kolísania výkonu sú v grafickom znázornení zreteľné. Grafické znázornenie nebolo upravené a zostalo ponechané v reálnom stave podľa meraní, aby bola zachovaná vierohodnosť údajov. Na záver merania bolo pozorované postupné znižovanie nabíjacieho prúdu batérií a postupné odpojenie elektrolyzéra, ktorý má zo svojej fyzikálnej podstaty dobehový alebo vypínací čas. Pre zaistenie bezpečného vypnutia systémov na konci merania bolo nutné ponechať zdroj energie (FV panely) zapnutý až do inicializácie vypnutia ostatných systémov. Ustálený výkon FV systému na pravom grafe bol dosiahnutý pri nulovom zatížení FV panelov a jasnej oblohe.

Implementácia MPPT algoritmu v zostavenom modeli pomocou simulácie

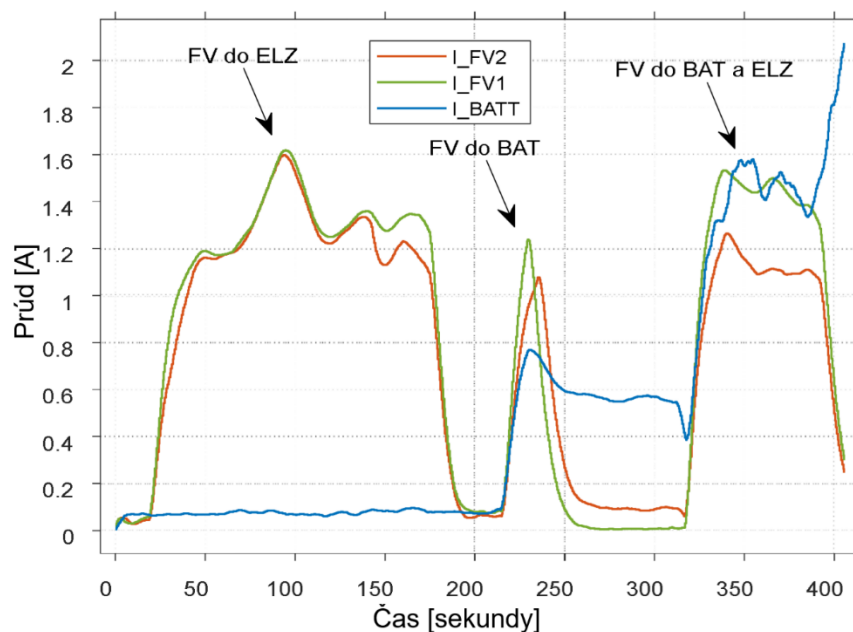
Na účely testovania bol PEMEL nahradený programovateľnou výkonovou záťažou. Tento krok bol vykonaný, aby sa zabránilo možnému poškodeniu a aby sa simulovalo odovzdávanie výkonu produkovaného fotovoltickým systémom.

V prvej časti **Obr. 13** je výkonová záťaž napájaná FV systémom. Štyri panely sú rozdelené do dvoch paralelných zapojení. Priemerný prúd produkovaný jedným panelom bol 0,6 A, pričom pri plnom žiarení (1000 W/m²) je to 1,12 A. Keďže vzťah medzi prúdom a žiarením je lineárny, ako je uvedené vo V-A charakteristike panela, hodnota produkovaného prúdu zodpovedá žiareniu 530 W/m². Táto hodnota sa takmer zhoduje s údajmi o radiácii NREL pre merané obdobie.

Ďalej, na **Obr. 13**, je viditeľné, že pri napájaní batérie z FV systému je pracovný bod FV systému posunutý úplne doprava. To je možné pozorovať na V-A charakteristike na **Obr. 1**. Po pripojení batérie a ELZ

(elektronickej záťaže) sú zmenené napäťové pomery na výstupe meniča, čo vedie k posunu pracovného bodu do inej oblasti.

Výsledkom je, že bolo zistené, že produkované prúdy sú dostatočné. Avšak napätie FV panela musí byť udržiavané na optimálnej úrovni pomocou MPPT algoritmu a meniča.

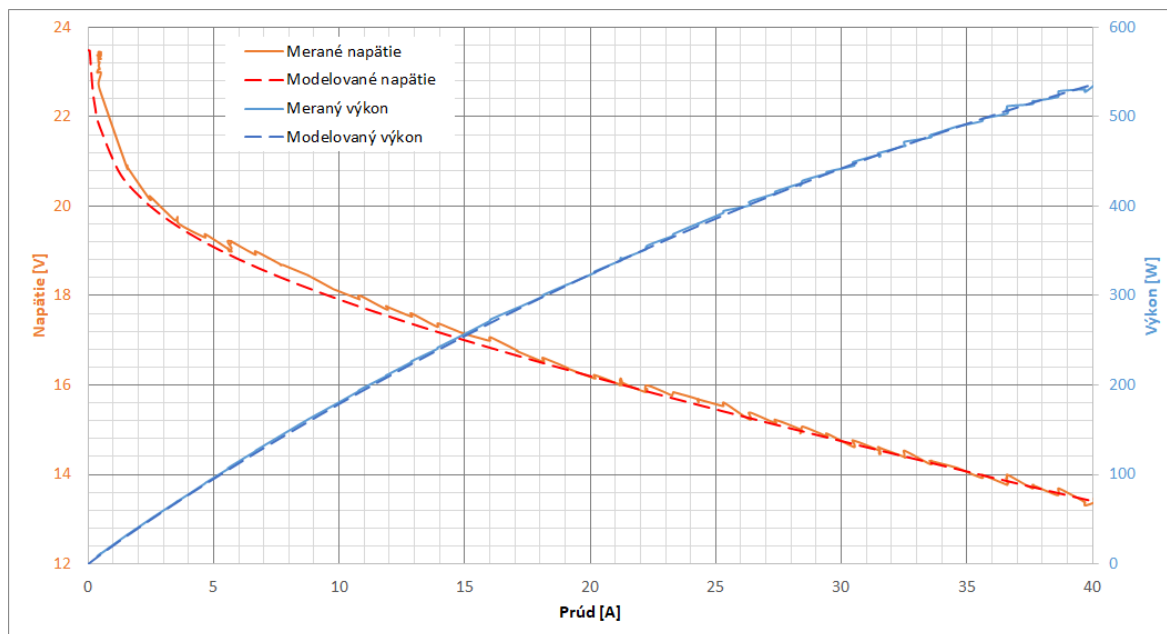


Obr. 13 Priebeh prúdov meraného modelu

3.2 Meranie laboratórneho palivového článku typu PEM

Meranie výkonu bolo vykonané na 500 W palivovom článku typu PEM od spoločnosti Horizon [41]. Tieto získané dáta boli následne podrobené porovnaniu s výsledkami, ktoré boli generované matematicko-simulačným modelom. Hlavným cieľom tohto porovnávacieho procesu bola verifikácia presnosti a spoľahlivosti použitého matematického modelu. Prostredníctvom tohto prístupu bolo možné potvrdiť korektnosť teoretických predpokladov a algoritmov, ktoré sú implementované v modeli, vo vzťahu k reálnej prevádzke palivového článku. Celý tento proces prispieva k lepšiemu pochopeniu správania palivových článkov a optimalizácii ich dizajnu a prevádzky v budúcnosti.

Boli realizované dve typy merania za približne štandardných podmienok (norma SATP). Pri prvom meraní boli predpokladané menšie prúdové skoky a kratšie časy ustálenia, zatiaľ čo pri druhom meraní boli uvažované väčšie prúdové skoky s dlhšími časmi ustálenia. Týmto spôsobom bola simulovaná dynamika rôznych reálnych záťaží, ktoré by sa nachádzali na výstupe namiesto použitej elektronickej záťaže.



Obr. 14 Porovnanie V-A a P-A charakteristiky prvého typu merania a modelu

Obr. 14 potvrdzuje, že veľkosť zmeny prúdového zaťaženia významne ovplyvňuje V-A a P-V charakteristiky palivového článku. Tieto pozorovania sa výrazne líšia od predpokladov zjednodušeného simulačného modelu, ktorý tieto dynamické javy nezohľadňuje. Rozdiel bol znateľný najviac v oblasti ohmických strát. Pri malých skokových zmenách prúdu (ako je vidieť na **Obr. 14**) je prísun vzduchu potrebný pre reakcie a chladenie relatívne stabilný a rovnomerne distribuovaný. Avšak, pri veľkých skokových zmenách zaťaženia dochádza k prudkému nárastu teploty a zvýšeniu otáčok ventilátora. Následkom toho je do palivového článku privádzané väčšie množstvo chladiaceho vzduchu. Časť tohto nadmerného vzduchu sa však dostáva aj na katódu, čo vedie k jej nadmernému vysušeniu. Toto vysušenie katódy spôsobuje zvýšenie ohmických strát.

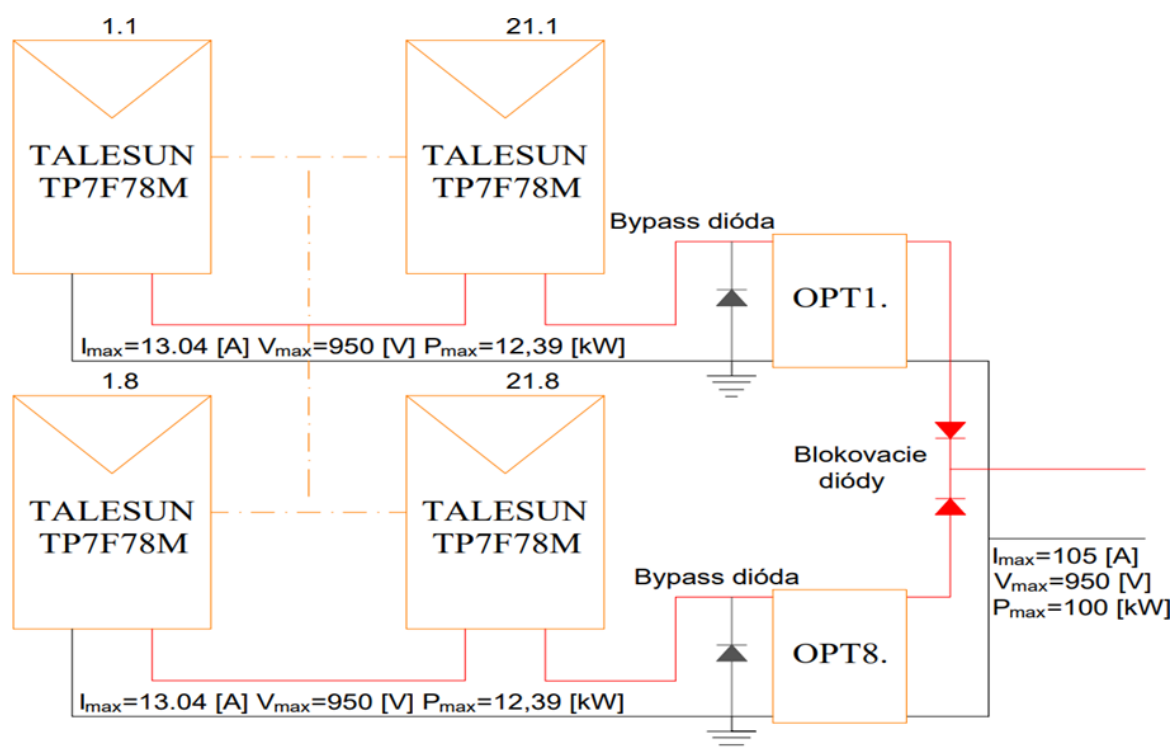
Súčasný matematicko-simulačný model považuje ohmické straty za konštantné. V reálnych podmienkach sú však ohmické straty ovplyvňované viacerými faktormi, ako sú teplota, obsah vody v palivovom článku a aktuálne podmienky zaťaženia. [49]

4 Návrh modulárneho systému s výstupným výkonom 100 kWp

V tejto kapitole je popísaný postup návrhu energetického zariadenia. Konkrétne je navrhnutý fotovoltaický systém s maximálnym výkonom 100 kWp, batériové úložisko s kapacitou 660 kWh a elektrolyzér, ktorý umožňuje produkciu vodíka pri spotrebe energie v rozsahu 33 až 100 kW. Pri tomto návrhu sú použité reálne komponenty a sú zohľadnené ich fyzikálne vlastnosti, pričom sa vychádza z topologického a fyzikálneho systému popísaného v Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..

4.1 Návrh systému fotovoltaických panelov s výkonom 100 kWp

Na inštaláciu bol vybraný monokryštalický FV panel TALESUN TP7F78M s polovičnou bunkou [48]. Vďaka tejto technológii je zabezpečený znížený vplyv nerovnomerného ožiarenia na ploche panelu (Tab. 7). FV panely sú usporiadané do ôsmich paralelných reťazcov, pričom každý reťazec je tvorený 21 panelmi (Obr. 15). Sériovým zapojením je dosiahnuté maximálne napätie 950 V a prúd 13 A. Celkovým zapojením je produkovaný prúd 105 A, napätie 950 V a výkon 100 kW.



Obr. 15 Schéma zapojenia navrhovaného 100 kWp FV systému

Okrem interných diód FV panelov je integrovaná aj Bypass dióda, ktorá eliminuje zlyhanie reťazca v prípade zatienenia jedného panelu, známeho ako efekt "HeatSpot" (stav kedy sa panel správa ako spotrebič). Energia z reťazca je následne privedená do optimizéra, kde je pomocou MPPT optimalizovaný výkon. Tok prúdu z jednotlivých reťazcov do hlavného meniča je usmerňovaný blokovacími diódami. Topológia znázorňovaná na Obr. 15 je identická so simulačnou schémou.

Tab. 7 Technický list FV panelu TALESUN TP7F78M [48]

Parametre	TALESUN TP7F78M
Max. výkon P _{max}	590 W
Napätie pri P _{max} (V_{mpp})	45,25 V
Prúd pri P _{max} (I_{mpp})	13,04 A
Napätie naprázdno (V_{oc})	53,87 V
Skratový prúd (I_{sc})	13,93 A
Teplotný koeficient (V_{oc})	-(0,26 ± 0,05) %/ °C
Teplotný koeficient (I_{sc})	(0,048 ± 0,01) %/ °C
Teplotný koeficient výkonu (P_{PV})	-(0,35 ± 0,05) %/ °C
NOCT ($T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$, $G_{NOCT} = 800\text{W/m}^2$, $v = 1\text{m/s}$)	43 ± 2
Usporiadanie článkov (Ser. × Par.)	156 (78 × 2) Half cell
Rozmery modulu	1134 × 2465 × 35 mm

4.2 Návrh batériového úložiska s kapacitou 660 kWh

Pri navrhovaní úložiska bola kladená požiadavka na zabezpečenie prevádzky PEMEL. Táto prevádzka musí byť udržaná buď pri tretinovom výkone, teda 33,3 kWh, po dobu 10 hodín s podmienkou, že kapacita batérie neklesne pod 50 %, alebo po dobu 20 hodín pri úplnom vybití úložiska, čo zodpovedá kapacite 660 kWh. Výkon PEMEL je v simulačnej schéme pri napájaní z batérií obmedzený na tretinu. Týmto sa predlžuje životnosť zariadenia, pretože sú znížené prúdové požiadavky. Okrem kapacity musí byť batériové úložisko na podobnej napäťovej a prúdovej úrovni ako zdroj a spotrebič energie, ktorými sú FV systém a PEMEL. Na základe predošlých poznatkov bola pre úložisko zvolená LiFePO₄ batéria, a to namiesto Li-ion článkov. Ak by boli použité Li-ion články, muselo by ich byť pre dosiahnutie potrebnej kapacity veľké množstvo, čo by viedlo k zvýšeniu poruchovosti, ako aj priestorových a hmotnostných požiadaviek. Systém spájania Li-ion článkov totiž tvorí nezanedbateľnú časť hmotnosti celej batérie.

Parametre použitého LiFePO₄ článku, ktorý je základným prvkom batérie. Článok sa vyznačuje veľkou kapacitou, dostatočnými nabíjacími a vybíjacími prúdmi a napäťovým rozsahom podobným ostatným Li-ion článkom. Keďže ide o použitie v stacionárnej aplikácii, hmotnosť nie je limitujúcim parametrom. Tvar článku umožňuje kompaktné zoskupovanie do celkov.

Tab. 8 Technická špecifikácia navrhnutého batériového systému

Parametre článku			Parametre batériového packu		
Názov veličiny	Jednotky		Názov veličiny	Jednotky	
Nom. napätie článku	3,5	V	Počet článkov zap. sér.	250	-
Max. napätie článku	4,2	V	Počet par. zap.	8	-
Min. napätie článku	3	V	Max. napätie batérie	1050	V
Kapacita článku	100	Ah	Nom. napätie batérie	875	V
Vybíjací C nom.	0,3	h ⁻¹	Min. napätie batérie	750	V
Vybíjací C max.	0,8	h ⁻¹	Stály vybíjací prúd	240	A
Nabíjací C nom.	0,3	h ⁻¹	Pokles napätia nom.	29,25	V

Nabíjací C max	0,8	h ⁻¹	Max. výkon batérie 0,3C	244,98	kW
Hmotnosť článku	2270	g	Nom. výkon 0,3C	202,98	kW
Vnútorný odpor článku	0,004	Ohm	Min. výkon 0,3C	180	kW
Stály vybíjací prúd článku	30	A	Max. vybíjací prúd 10 s	640	A
Pokles napätia článku nom.	0,117	V	Pokles napätia max.	78	V
Špičkový prúd článku 10 s	80	A	Max. výkon batérie 0,8C	622,08	kW
Pokles napätia článku max.	0,312	V	Nom. výkon 0,8C	510,08	kW
Stály nabíjací prúd článku	30	A	Min. výkon 0,8C	480	kW
Energia článku nom.	350	Wh	Nabíjací prúd nom.	240	A
Vnútorný odpor batérie	0,122	Ohm	Nabíjací prúd max. 10 s	640	A
Počet modulov	5	-	Nabíjací výkon nom.	210	kW
Počet segmentov v module	8	-	Nabíjací výkon max 10 s	560	kW
Počet ser. článkov v seg.	50	-	Celková kapacita	800	Ah
Počet článkov v module	400	-	Celková energia batérie	700	kWh
Celkový počet článkov	2000	-	Váha	4540	kg

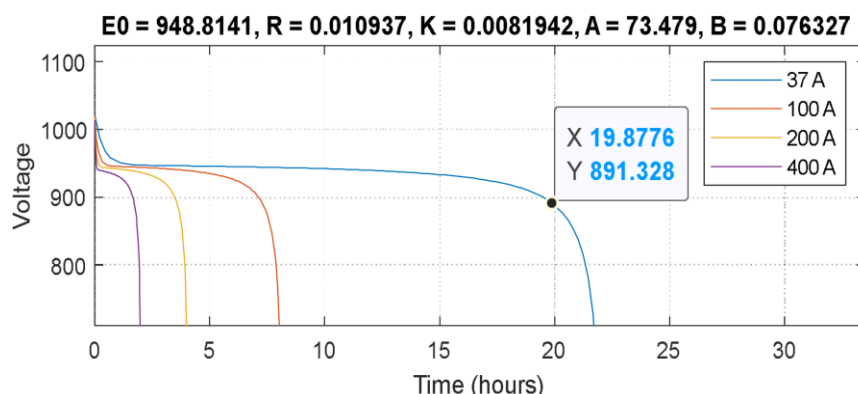
Nabíjací/vybíjací výkon je dvojnásobný v porovnaní s príkonovými/výkonovými charakteristikami FV systému a PEMEL. Toto nastavenie je nevyhnutné z dôvodu veľkých prúdových a napäťových zmien DC-DC meniča. **Tab. 8** zobrazuje výsledné parametre batériového úložiska, ktoré je tvorené 50 sériovými článkami od firmy CATL formujúcimi segment. Z ôsmich segmentov zapojených paralelne je vytvorený modul. Päť modulov zapojených sériovo potom tvorí samotné úložisko.

4.2.1 Simulácia batériového úložiska s kapacitou 660 kWh

Simulačný model bol vytvorený v prostredí Simscape Battery, konkrétne s použitím nástroja Battery Pack Model Builder. Tento nástroj automatizuje tvorbu simulačných modelov, umožňuje porovnávanie rôznych architektur a topológií a parametrizáciu modelov.

Na dosiahnutie presných simulačných výsledkov, ktoré zodpovedajú reálnemu systému batériového úložiska, je správanie článku modelované pomocou stavového vektora. Toto modelovanie je špecificky založené na závislostiach napätia článku na prázdno (V_{OC}) a vnútorného odporu (R_{θ}) od SOC a teploty (T) článku.

Reálne namerané údaje, ktoré boli získané z databázy Simscape, sú použité pre lítiové články. Správanie mimo vektorových hodnôt je v simulácii popísané pomocou lineárnej extrapolácie. Na **Obr. 16** je zobrazená vybíjacia charakteristika batérie. Predpokladá sa, že prevádzka PEMEL pri vybíjacom prúde 37 A je zabezpečená po dobu približne 20 hodín.



Obr. 16 Vybíjacia charakteristika modelovaného BESS

4.3 Elektrolyzér typu PEM s príkonom 100 kW

Pre simuláciu bol použitý skutočný systém PEM elektrolyzéra NEL C SERIES C20. Tento systém, okrem samotného PEM článku, je vybavený aj výmenníkom tepla, detektorom plynov, separátorom a vysušovačom pre vodíkovú aj kyslíkovú fázu. Konkrétne parametre systému a referenčné údaje sú uvedené v **Tab. 9**.

Pri výkone PEM elektrolyzéra je produkovaných 43,3 kg vodíka za 24 hodín. Vzhľadom na energetickú hustotu vodíka 33,3 kWh/kg je to ekvivalentné 1441,89 kWh energie uskladnenej vo forme vodíka. Na jeho výrobu je spotrebovaných 2880 kWh elektrickej energie, čím je potvrdená účinnosť premeny elektrickej energie na vodík na úrovni 50 %. Zvyšný tepelný výkon P_{heat} je odvádzaný do výmenníka chladením.

Systém PEMEL môže byť prevádzkovaný v rozsahu elektrického príkonu 0 až 100 %. Nominálny výkon nemusí byť dodávaný počas celej doby prevádzky, čo je požiadavka pre danú aplikáciu. Skutočné parametre systému PEMEL sú zohľadnené v simulačnej schéme prostredníctvom ekvivalentného modelu. Dynamika katódy a anódy je zohľadnená paralelnými RC obvodmi, podobne ako pri 80 W modeli.

Pre dosiahnutie presnejších výsledkov je objemová hustota vodíka (ρ_{H_2} [kg/l]) vypočítavaná s ohľadom na aktuálny tlak a teplotu. Reverzná napätie (E_{rev} [V]) je ovplyvnené pracovným tlakom a teplotou systému PEMEL, čo sa taktiež prejavuje na produkcii vodíka.

Tab. 9 Technické parametre PEM elektrolyzéra NEL C Series C20 [50]

Parametre 100 kWp PEMEL	NEL C SERIES C20
Pracovný tlak (P_{nom})	30 atm
Spotreba energie (P_{nom}/H_2)	66,70 kWh/kg _{H2}
Produkcia H_2 pri P_{EL} = 120 kW	43,3 kg/24h
Čistota produkovaného vodíka	99,9998 %
Výkonový pracovný rozsah (P_{0-100})	0 až 100 %
Spotreba H_2O	17.9 L/h
Maximálny tepelný výkon (P_{heat})	64 kW
Účinnosť systému (η)	50 %
Pracovný elektrický príkon (P_{EL})	120 kW / 160 kVA
Prac. rozsah teplôt membrány (T_{PEMEL})	5 až 60 °C
Komunikačné rozhranie	Modbus TCP/IP
Hmotnosť	2924 kg

Spínacie prvky SW5 a SW7 sú použité na obmedzenie výkonu, keďže systém PEMEL je napájaný z batériového úložiska s minimálnym elektrickým príkonom 33 kW a pri stálom napätí 330 V. Pri príkone 100 kW je dosiahnutie ustáleného objemu produkcie vodíka pozorované po približne 600 sekundách. Z dôvodu dynamických vlastností nie je efektívne systém PEMEL cyklicky zapínať a vypínať.

4.4 Návrh úložiska vodíka

Vodík, ktorý je produkováný PEMEL zariadením, má tlak 30 barov (alebo 3 MPa). Pre optimalizáciu objemu a následné prečerpávanie, napríklad do metalhydridových nádrží vozidiel, ktorých tlak sa pohybuje medzi 350 a 700 barmi, je nevyhnutné tento vodík stlačiť.

Na stláčanie vodíka sa používajú rôzne technológie:

- **Elektrochemické kompresory:** Tieto kompresory predstavujú najpokročilejšiu technológiu. Kaskádové zostavy MEA (z angl. Membrane Electrode Assembly) zvyšujú tlak vodíka vo viacerých stupňoch až na 800 barov.
- **Hydridové kompresory:** Pri tejto metóde dochádza k naviazaniu vodíka na hydrid pri okolitej teplote. Následne je uvoľnený vysokotlakový plyn pri vysokých teplotách.
- **Piestové kompresory:** Tieto kompresory sú najpoužívanejšie. Kompresná práca je závislá od termodynamického procesu.

Vodík, ktorý je generovaný systémom PEMEL, je pri rovnakom tlaku privádzaný do kompresora. Tam je postupne stláčaný až na požadovaný tlak 700 barov. Následne je uskladnený v nádrži s objemom 1 m³. Straty sú znázornené pomocou Simulink bloku potrubia.

Skutočné vlastnosti vodíka sú opísané blokom "Hydrogen properties", ktorý využíva vektory teploty, hustoty, tlaku, viskozity, entalpie a iných parametrov. Hmotnostný prietok je integrovaný, aby sa vypočítalo celkové množstvo vyrobeného vodíka (mH_made) v kilogramoch.

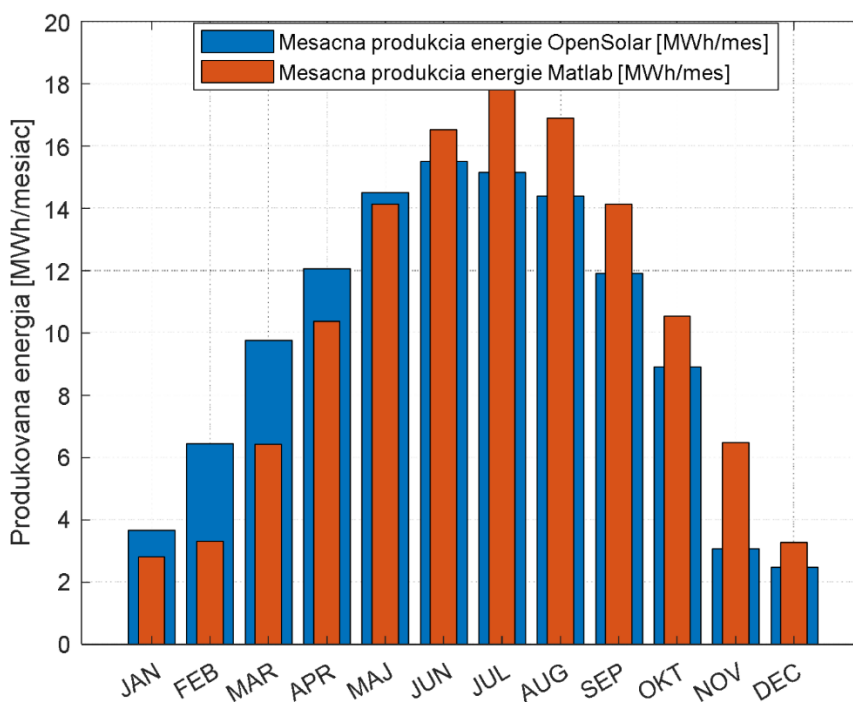
Výsledkom simulácie sú priebehy tlaku a teplôt v skladovacej nádobe, ako aj čas potrebný na stlačenie. Tieto informácie sú dôležité pre optimalizáciu veľkosti skladovacej nádrže, pretože s rastúcim objemom sa zvyšuje aj čas potrebný na dosiahnutie požadovaného tlaku. Aktuálny príkon kompresora je vypočítaný z výstupného tlaku (P_{nadrz}). [51]

4.5 Energetické toky simulovaného modulárneho systému s výstupným výkonom 100 kWp

V návrhu systému boli použité identické riadiace a optimalizačné algoritmy, ako boli aplikované pri modeli FV systému s výkonom 80 W. Cieľom tohto návrhu je však zabezpečiť produkciu vodíka, pričom sa udržiava približne 50 % stav nabitia batérie. Táto energia môže byť následne využitá pre ďalšie aplikácie, ako je napríklad nabíjanie elektromobilov.

Ročná produkcia energie FV systémom

Dostupné komerčné softvérové nástroje na návrh fotovoltaických systémov boli použité na porovnanie množstva vyprodukovanej energie s výsledkami simulačného návrhu. Konkrétne, softvér OpenSolar bol využitý na vytvorenie modelu, ktorý obsahoval 168 identických panelov typu TALESUN TP7F78M. [48]



Obr. 17 Porovnanie produkcie energie FV systémom simulovanej programom Matlab a OpenSolar

Na **Obr. 17** je možné vidieť porovnanie mesačnej produkcie energie (MWh/mesiac). Celková ročná produkcia energie bola 122,69 MWh v návrhu vytvorenom v prostredí Matlab-Simulink, zatiaľ čo prostredníctvom softvéru OpenSolar bolo dosiahnutých 115,82 MWh. Medzi týmito dvoma metódami návrhu bol zaznamenaný rozdiel 5,6 %.

Tento rozdiel, ktorý je pozorovateľný v celkovej produkcii, ako aj v mesačnom rozložení, je spôsobený odlišnými prístupmi k dátam. V Matlab-Simulink sú pri výpočtoch použité aproximované dáta, zatiaľ čo v OpenSolare sú využité databázy s nameranými hodnotami slnečného žiarenia pre konkrétnu geografickú polohu. Napriek tomu je tento rozdiel považovaný za zanedbateľný, čo potvrdzuje správnosť navrhnutého riešenia.

Metodológia testovania modelu modulárneho systému

Pre zabezpečenie komplexného zhodnotenia výkonnosti 100 kWp systému boli stanovené špecifické testovacie protokoly, ktoré zahŕňali dva počiatočné stavy batériového úložiska. Systém bol skúmaný tak v stave, keď je batéria plne nabitá, ako aj v situácii, keď je batéria úplne vybitá. Tieto stavy sú kľúčové pre pochopenie dynamiky nabíjania a vybíjania.

Okrem stavu batérie bol systém podrobený testom pri troch rôznych úrovniach slnečnej radiácie, ktoré simulujú typické podmienky počas roka. Tieto úrovne boli vybrané tak, aby reprezentovali špecifické sezónne obdobia:

- Zimné obdobie: Predpokladá sa nízka úroveň slnečnej radiácie.
- Jarné/Jesenné obdobie: Charakterizované strednou úrovňou slnečnej radiácie.
- Letné obdobie: Očakáva sa vysoká úroveň slnečnej radiácie.

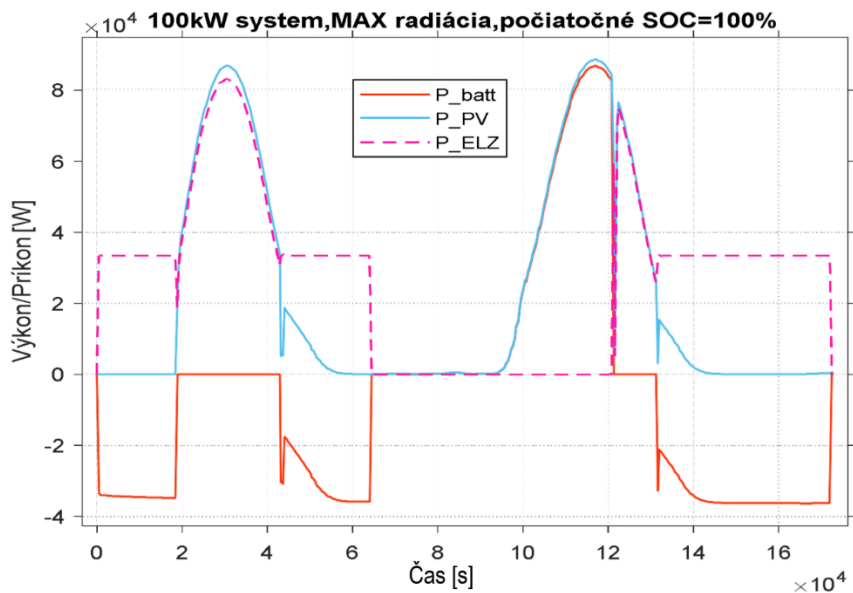
Týmto spôsobom bolo možné presne posúdiť, ako sa systém správa v rôznych environmentálnych podmienkach a ako efektívne je schopný využívať dostupnú solárnu energiu naprieč ročnými obdobiami. Získané dáta poskytli komplexný obraz o prevádzkovej spoľahlivosti a účinnosti systému.

4.5.2 Simulácia systému s nabitým batériovým úložiskom

Energia z plne nabitej batérie, ktorá akumuluje 660 kWh, bola riadená tak, aby v prípade prebytku – teda keď bola batéria nabitá a bolo prítomné žiarenie – bola presmerovaná do PEMEL, kde sa premení na vodík. Naopak, ak bola batéria vybitá, bol najskôr zabezpečený stav nabitia nad 50 %, a až následne sa z prebytočnej energie vyrábala vodík. Pre pokročilejšie riešenie by bolo vhodné zvážiť prediktívne riadenie a odhad žiarenia na základe meteorologických údajov.

Scenár 1 – Maximálna radiácia – Leto

Na **Obr. 18** sú zobrazené aktuálne profily spotreby energie PEMEL, výstupného výkonu fotovoltického systému a stavu batériového úložiska v priebehu 48 hodín. Hoci potenciálny FV výkon pri radiácii 1000 W/m^2 by mal byť 100 kW, skutočný maximálny výkon bol obmedzený na 87 kW pri rovnakej úrovni radiácie na všetkých paneloch. Toto bolo spôsobené zohľadnením teploty okolia a závislosti teploty FV panelov od generovanej energie.



Obr. 18 Priebeh výkonu systému pri maximálnej radiácii s nabitým batériovým úložiskom

S počiatočným stavom nabitia 100% bola batéria použitá na napájanie PEMEL po dobu 5,2 hodiny. Následne, po tom, čo FV výkon dosiahol viac ako 33 kW, bola batéria odpojená a spotreba energie PEMEL bola

zvyšovaná v závislosti od produkcie FV systému. V čase $6,5 \times 10^4$ sekundy bol zaznamenaný SOC pod 50 %, čo viedlo k zastaveniu produkcie vodíka. Následne došlo k opätovnému nabíjaniu batérie.

V čase $12,1 \times 10^4$ sekundy bola vykonaná zmena záťaže FV systému z batérie na PEMEL. Takéto zmeny nie sú vhodné vykonávať pri maximálnom výkone FV systému, pretože sú príčinou energetických strát. Účinnosť DC-DC meničov bola zohľadnená v simulačnom návrhu a pohybuje sa v rozsahu 95 až 98 %.

Počas napájania PEMEL bol pozorovaný mierny nárast výkonu batérie (z 34,5 kW na 36,7 kW), a to aj napriek konštantnému príkonu PEMEL. Toto je pripísané spotrebe energie kompresora, ktorá je závislá od tlaku, na ktorý je stláčaný vyrobený vodík.

4.5.3 Simulácia systému s vybitým batériovým úložiskom

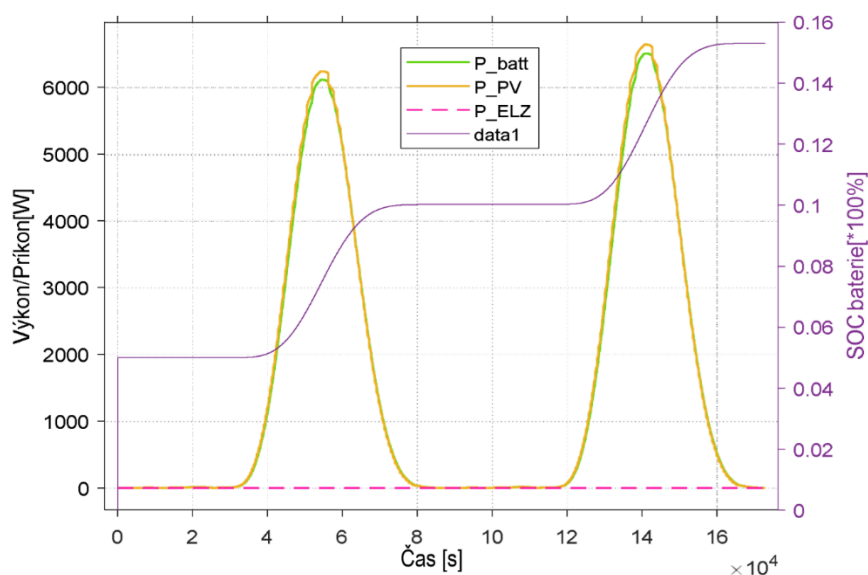
Kapacita batérie bola stanovená na 660 kW. Toto rozhodnutie vychádzalo z dvoch hlavných predpokladov. Predpokladaného množstva energie získanej z fotovoltického systému počas dňa s najvyšším slnečným žiarením a potreby zabezpečiť minimálne 50 % stav nabitia po 10 hodinách prevádzky PEM elektrolýzera.

V nadchádzajúcom testovaní bol počiatočný stav nabitia batérie nastavený na 5 %. Funkcia systému bola primárne optimalizovaná na udržanie batérie nabitej minimálne na polovicu. Následne bol z prebytočnej energie vyrábaný vodík.

Scenár 3 – Minimálna radiácia – Zima

V zimných mesiacoch ako napríklad v januári, keď je úroveň radiácie minimálna, sa vyrobí len 6 kW elektrickej energie. Toto množstvo postačuje na nabitie batérie o 11 % v priebehu 48 hodín (**Obr. 19**).

Úplné nabitie batérie nie je možné predpovedať lineárne, keďže intenzita radiácie sa každý deň nelineárne zvyšuje. Podľa výsledkov simulácií by malo byť dosiahnuté plné nabitie za 6 dní. Počas tohto obdobia nie je produkován žiadny vodík.



Obr. 19 Priebeh výkonu systému pri minimálnej radiácii s vybitým batériovým úložiskom

5 Štúdia využiteľnosti navrhovaného modulárneho systému v automobilovom sektore

Navrhovaný systém, respektíve vytvorený simulačný model, bol použitý na návrh čerpacej stanice pre vodíkový autobus. V rámci tejto kapitoly je opísaná štúdia, ktorá určuje, do akej miery je možné pokryť spotrebu vodíka autobusu v mestskej premávke systémom s výkonom FV systému 100 kWp. Autobus bol zvolený na základe reálnych požiadaviek mestskej hromadnej dopravy v slovenskom regióne. Následne bola spotreba vodíka vypočítaná na základe jazdného cyklu a vytvoreného simulačného modelu. Množstvá vyrobeného a spotrebovaného vodíka boli následne porovnané v čase, v závislosti od stavu nabitia batérie a slnečného žiarenie.

5.1 Výber simulovaného autobusu a normovanie spotreby

Pre jednoduchšie porovnanie simulačných výsledkov s realitou bol na účely výpočtu použitý reálny model autobusu Solbus SM12H2F. Tento autobus, poháňaný vodíkom, je v súčasnosti prevádzkovaný v rôznych európskych mestách. Jeho batéria s kapacitou 37,8 kWh neovplyvní výpočet, keďže jej jedinou funkciou je vyrovňovanie výkonových špičiek prostredníctvom dočasného uskladnenia energie. Parametre a technický list tohto vozidla sú uvedené v **Tab. 10**.

Tab. 10 Technický list autobusu Solbus SM12H2F

Parametre	Solbus SM12H2F
Celkový dojazd	450 km
Dĺžka dopĺňania vodíka	15 min
Skladovací tlak	350 bar
Kapacita vodíka	30 kg
Palivový článok	HyMove Fuel cell system 60 kW
Kapacita cestujúcich	0,3 C = 50 A
Rozmery pneumatík (Predné - Zadné)	275/70R22.5 - 455/45R22.5
Nominálny výkon	226 kW
Maximálny výkon	364 kW
Koeficient odporu vzduchu	0,4
Rozmery	12000 × 2500 × 3100 mm
Hmotnosť	12550 kg

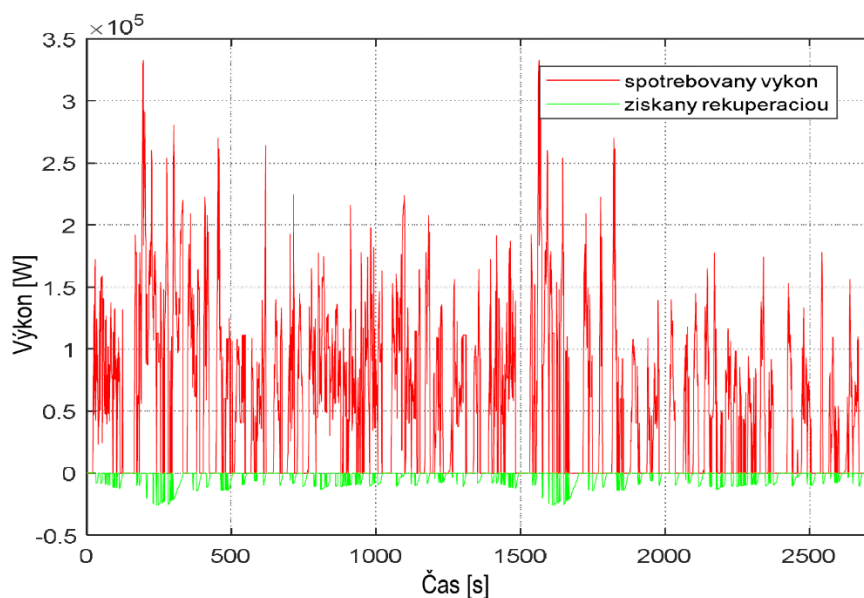
Spotreba v zmysle simulácie jazdných odporov

Celkový odpor pôsobiaci proti pohybu vozidla F_c [N] predstavuje:

$$F_z = F_g * C_r + F_g * \sin \alpha + \frac{1}{2} * S * C * \rho * v^2 + m * a * \delta \quad (2)$$

V rámci simulácie sú definované vzťahy, ktoré slúžia ako vstupné dáta. Na základe týchto vstupov a dát z jazdných cyklov sa vypočítava spotreba autobusu na 100 km.

Na **Obr. 20** je zobrazený priebeh výkonu na kolesách konkrétneho autobusu počas jazdného cyklu UDDS. Po tomto znázornení je vypočítaná spotreba elektrickej energie pohonného systému. Následne je spotreba znížená o rekuperovanú energiu. To znamená, že počas brzdenia je palivový článok neaktívny a rekuperovaná energia je ukladaná v batérii. Pre autobus Solbus bola na základe UDDS cyklu simulovaná spotreba 120,8 kWh.

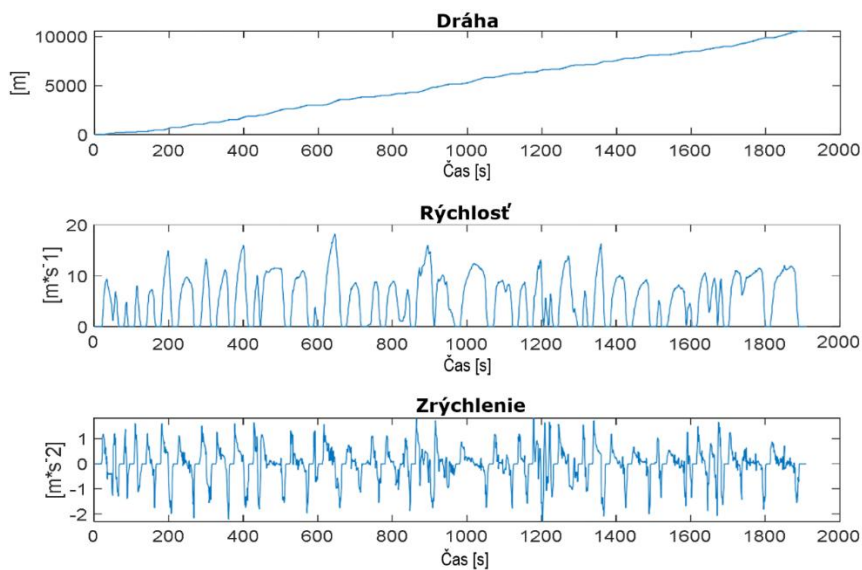


Obr. 20 Priebeh výkonov vozidla počas jazdného cyklu UDDS

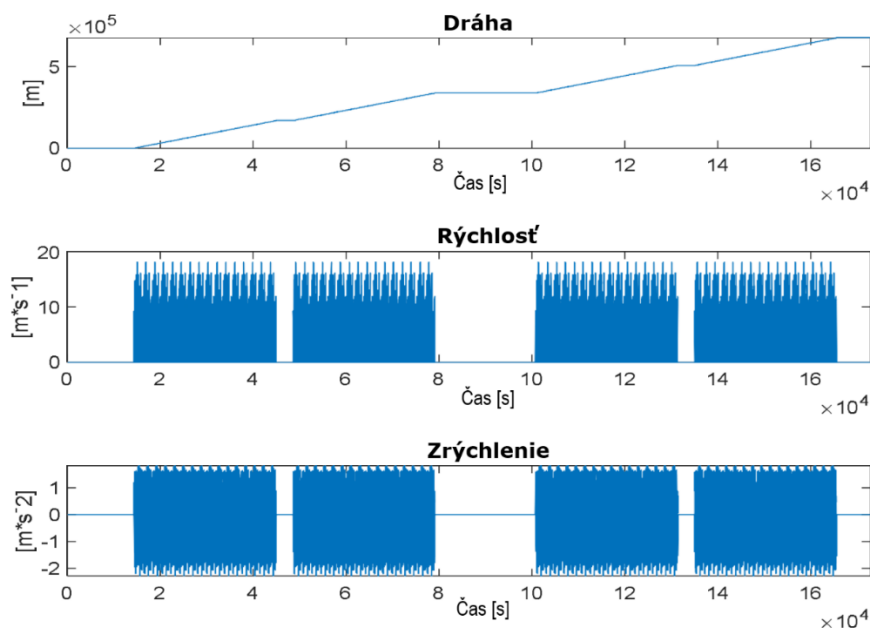
Rôzne jazdné cykly sú využívané na výpočet normovanej spotreby paliva. Rozdiely medzi týmito cyklami sú predovšetkým zaznamenané v priemernej rýchlosti, prejdenej vzdialenosti, zrýchlení a dĺžke zastavenia. Cykly sú ďalej klasifikované podľa typu testovaného vozidla, ako sú dodávky, osobné vozidlá alebo kamióny, a tiež podľa jazdného profilu, ktorý môže zahŕňať mestskú, medzimestskú alebo diaľničnú prevádzku. [52,53]

5.2 Modelovanie a simulovanie reálneho jazdného cyklu

Údaje pre zrýchlenie, rýchlosť a dráhu reálneho jazdného cyklu sú zobrazené na **Obr. 21**. Tieto údaje boli získané meraním zrýchlenia a pochádzajú z databázy DriveCAT Transit Bus Cycle (US-OCTA). Počas jedného cyklu bolo autobusom prejdenej 10,5 km a bola dosiahnutá maximálna rýchlosť 17,5 m/s (63 km/h). [54]



Obr. 21 Vykreslenie výstupných dát simulácie jazdných cyklov



Obr. 22 48-hodinový jazdný cyklus autobusu

Z dodaných dát bol vytvorený 48-hodinový cyklus autobusu (**Obr. 22**). Počas tohto cyklu sa prejde celkovo 675 kilometrov. Jazdy sú rozdelené do 64 úsekov, pričom každý úsek trvá 8 hodín. Prestávky sú určené na tankovanie vodíka. Tento jazdný cyklus bol navrhnutý tak, aby reprezentoval použitie vozidla v kyvadlovej doprave.

5.3 Porovnanie spotreby vodíkového autobusu a možností výroby vodíka navrhovaného modulárneho systému

Primárnym účelom tejto analýzy je posúdenie, do akej miery je navrhovaný systém, pozostávajúci z fotovoltických panelov, batérie a PEM elektrolyzéra, schopný pokryť spotrebu vodíkového autobusu Solbus počas simulovaného jazdného cyklu v mestskej premávke. Počas simulácie bola produkcia vodíka riadená v závislosti od stavu systému (konkrétne stavu nabitia batérie – SOC, úrovne radiácie a teploty), zatiaľ čo autobus simultánne vykonával stanovený jazdný cyklus.

Analýza bola štruktúrovaná do dvoch hlavných častí:

- Simulácia produkcie vodíka pri nabitom batériovom systéme – SOC = 95%:
 - Maximálna úroveň radiácie – Leto
 - Priemerná úroveň radiácie – Jar / Jeseň
 - Minimálna úroveň radiácie – Zima
- Simulácia produkcie vodíka pri vybitom batériovom systéme – SOC = 5%:
 - Maximálna úroveň radiácie – Leto
 - Priemerná úroveň radiácie – Jar / Jeseň
 - Minimálna úroveň radiácie – Zima

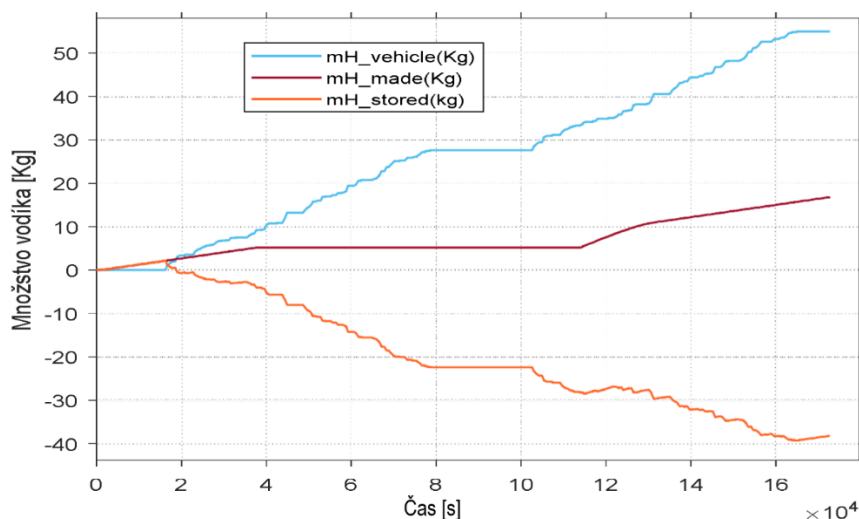
Výsledkom analýzy je súhrnný prehľad, ktorý podrobne opisuje úroveň pokrytia spotreby vodíkového autobusu v závislosti od rôznych ročných období a počiatočného stavu batérie navrhovaného systému.

5.3.1 Simulácia produkcie vodíka pri nabitom batériovom systéme

Na **Obr. 23** sú zobrazené tri kľúčové parametre: spotreba vodíka vodíkového autobusu (*mH2_vehicle*) počas cyklu, množstvo vodíka vyprodukované navrhnutým systémom (*mH2_made*) a množstvo vodíka uložené v zásobníku (*mH2_stored*).

Po prejení vzdialenosti 672 km a 32 hodinách prevádzky bolo autobusom spotrebovaných 55 kg vodíka. Táto hodnota predstavuje normovanú spotrebu vodíka 8,14 kg/100 km. V porovnaní s údajmi výrobcu je dosiahnutá spotreba o približne 1,54 kg vyššia, čo je spôsobené testovaním v náročnejšom reálnom jazdnom cykle. Celková elektrická spotreba počas cyklu dosiahla 978 kWh, čo zodpovedá 145 kWh/100 km.

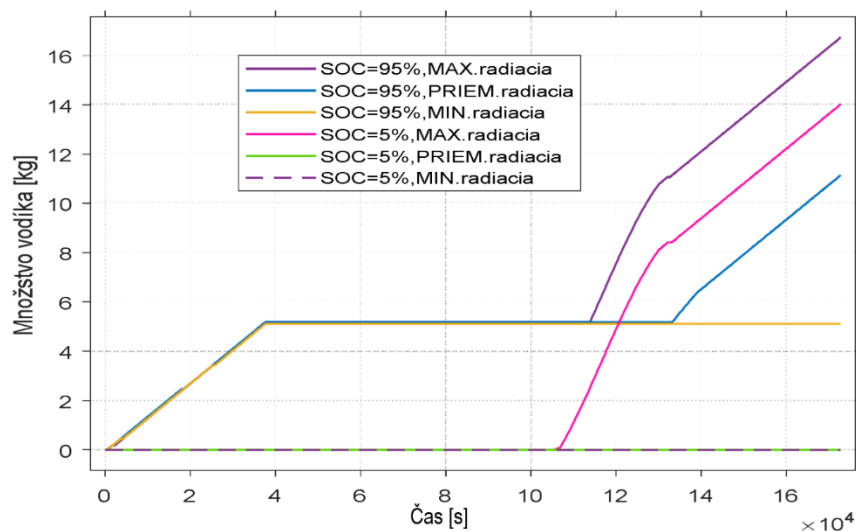
Celkovo bolo systémom vyprodukovaných 17 kg vodíka za 48 hodín. Toto množstvo vyprodukovaného vodíka pokryje dojazd 208 km, čo predstavuje 31 % z celkovej spotreby. Na výrobu vodíka bolo spotrebovaných 1056 kWh elektrickej energie, ktorá bola získaná z fotovoltického systému. Rozdiel medzi spotrebou a výrobou je 38 kg. V prípade realizácie systému by toto množstvo muselo byť doplnené z iného zdroja vodíka.



Obr. 23 Pribeh a porovnanie výroby, uskladnenia a spotreby vodíka

Navrhnutý systém bol zjednodušený tým, že neobsahuje manažment prečerpávania vodíka zo systému do vozidla. Táto oblasť sa nemusí riešiť, pretože systém nepokryje celú spotrebu autobusu. Účinnosť premeny FV energie na vodík pomocou PEMEL je 52 %. Následne, účinnosť premeny vodíka na elektrickú energiu pomocou palivového článku vozidla dosahuje 50 %. Prehľad produkcie vodíka za 48 hodín pre rôzne stavy systému je zhrnutý na **Obr. 24**. Je to spôsobené tým, že spotreba autobusu sa počas cyklu nemení v závislosti od radiácie a stavu batérie.

Najvyššia produkcia vodíka, a to 17 kg H₂, bola dosiahnutá na začiatku testu, keď bola nameraná maximálna radiácia a batéria bola plne nabitá. Akumulátor mal značný vplyv, keďže pri vybíjanej batérii, ale maximálnej radiácii, bola zaznamenaná produkcia 14 kg vodíka. Ďalej bolo systémom vyprodukovaných 11,2 kg vodíka v prípade udržania 50 % stavu nabitia batérie a priemernej radiácie. Pri minimálnej radiácii a plnej batérii bolo zaznamenaných 5,2 kg produkcie. Vo všetkých ostatných prípadoch nebola žiadna produkcia vodíka zaznamenaná.



Obr. 24 Produkcia vodíka pri zvolených scenároch

V **Tab. 11** boli v stĺpci FV zaznamenané hodnoty vyrobenej fotovoltaickej energie v závislosti od celkového stavu systému počas 48 hodín. Bolo zistené, že existuje potenciál na optimalizáciu energetických tokov. Táto optimalizácia môže byť dosiahnutá prostredníctvom odhadu radiácie na nasledujúci deň a následného prispôsobenia stavu nabitia batérie.

Napríklad, pri maximálnej radiácii a počiatočnom stave nabitia batérie 5 % bolo vyrobených 1242 kWh. Avšak, pri SOC 95 % bolo vyrobených len 782 kWh. To naznačuje, že plný potenciál fotovoltaického systému nebol využitý, pretože batéria bola plná a prebytočná energia nemohla byť uskladnená. Prediktívnym riadením a odhadom radiácie by batéria mohla napájať PEM elektrolyzér počas noci až do vybitia. Týmto spôsobom by mohla byť zvýšená akumulovaná energia v batérii počas dňa. Množstvo energie vložené do batérie alebo odobranej z nej je vyjadrené v stĺpcoch Batéria IN a Batéria OUT. Stĺpec DIFER reprezentuje konečný rozdiel energie v batérii po testovaní. Množstvo energie dodanej elektrolyzéro je uvedené v stĺpci PEMEL. Množstvo vyrobeného vodíka je zaznamenané ako mH2 a uskladnená energia vo forme vodíka ako H2 energia. V dvoch posledných prípadoch (mH2 a H2 energia) nebola zaznamenaná žiadna výroba vodíka. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri maximálnej radiácii a počiatočne vybitej batérii, kedy bolo finálne uskladnených 466,2 kWh vo forme vodíka a 356,7 kWh v batérii.

Tab. 11 Bilancia simulačného modelu navrhovaného 100 kWp systému

Stav systému	FV	PEMEL	Batéria IN	Batéria OUT	Batéria DIFER.	mH2	H2 energia	Pokrytie spotreby
Jednotky:	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kg]	[kWh]	[%]
Max.rad. SOC = 95%	782	1039	395	-714,7	-319	17	566,1	30,9
Priem.rad. SOC = 95%	504	691	377	-610	-233	11,2	372,9	20,3
Min.rad. SOC = 95%	70,8	335,6	69,3	-350	-281,4	5,1	169,8	9,2
Max.rad. SOC = 5%	1242	832,3	712,7	-356	356,7	14	466,2	25,4
Priem. rad. SOC = 5%	575	0	563,5	0	563,5	0	0	0
Min. rad. SOC = 5%	70,8	0	69,4	0	69,4	0	0	0

5.4 Ekonomická a ekologická bilancia navrhovaného modulárneho systému

Cena a ekologický prínos sú dôležité parametre, ktoré sa berú do úvahy pri návrhu systému. Okrem energetickej optimalizácie je ďalším cieľom zníženie emisií dopravných prostriedkov. Hodnotenie celkových nákladov zostaveného modelu pre účely čerpacej stanice nie je relevantné, preto sa pozornosť zameriava na prínos v hromadnej doprave.

Zostavený fotovoltaický systém vyprodukuje za kalendárny rok približne 115 820 kWh elektrickej energie. Tento údaj bol získaný na základe simulačných výsledkov a softvéru OpenSolar. Výsledné údaje o vyprodukovanom vodíku vychádzajúce zo simulácie sú uvedené v **Tab. 11**, stĺpec *mH2*.

Toto množstvo energie je dostatočné na pokrytie 20 810 km jazdy vybraného autobusu počas reálneho jazdného cyklu. Vzhľadom na to, že ročný nájazd autobusu počas pracovných dní dosahuje 87 750 km, čerpacia stanica pokryje 23,7 % celkovej spotreby. Na základe týchto údajov sa normované množstvo sivého vodíka, ktoré by bolo potrebné zabezpečiť z externého zdroja, zníži z 8,14 kg/100km na 6,21 kg/100km.

Prehľad ekonomických a ekologických parametrov prevádzky rôznych typov autobusov je uvedený v **Tab. 12**. Riadok „Vodík-EXT“ popisuje prevádzkové parametre pri čerpaní sivého vodíka z externého zdroja. Tomuto variantu prislúchajú vyššie prevádzkové náklady a vyššie emisie, nakoľko sa nejedná o výrobu z obnoviteľných zdrojov energie.

Po doplnení navrhovaného systému čerpacej stanice sa spotrebované množstvo sivého vodíka zníži, čím sa znížia prevádzkové náklady na úroveň dieselového autobusu (**Tab. 12** stĺpec *Jedn. cena paliva*). Produkovalé emisie sú však v tomto prípade až 4-násobne nižšie.

Hoci elektrický autobus predstavuje najefektívnejší spôsob dopravy vďaka najvyššej účinnosti premeny energie (95 %), čo znamená spotrebu 522×10^6 J energie, zabezpečenie denného dojazdu 337 km je pri súčasnej infraštruktúre nabíjajúcich bodov a možnosti zaťaženia elektrických sietí veľmi komplikované.

Riešenie, ktoré zahŕňa čerpaciu stanicu, je realizovateľné. Zvýšením podielu vodíka z OZE voči sivému vodíku sa prevádzkové náklady znížia pod 52 €/100km a emisie výrazne klesnú (**Tab. 12** stĺpec *Jedn. cena paliva*). Dôležité je poznamenať, že emisie pri naftovom pohone zohľadňujú výrobu aj spaľovanie paliva, zatiaľ čo pri elektrine a vodíku sa berie do úvahy len ich výroba.

Tab. 12 Bilancia spotreby paliva, energie a emisií zvoleného autobusu pri rôznych typoch pohonného systému (*ceny platné k 11. týždňu 2025*)

Typ autobusu	Spotreba paliva	Spotreba energie	Jedn. cena paliva	Cena paliva 1 deň jazdy	Emisie CO ₂	Emisie CO ₂ 1 deň
Elektrický	145 kWh	$522 \cdot 10^6$	29 - 72	97 - 243	43	97 - 155
DieselEuroV	35 L	$136 \cdot 10^7$	52	175	190	641
Vodík-EXT	8,14 kg	$975 \cdot 10^6$	65 - 84	219 - 283	75	253
Vodík-ČS	6,21 kg	$975 \cdot 10^6$	49 - 62	165 - 209	57	192
Jednotky	/100km	J	€/100km	€/337km	kg/100km	kg/337km

Záver

Výskumná činnosť, popísaná v záverečnej práci, bola zameraná na analýzu, modelovanie a simuláciu interoperability úložiskových systémov v kombinácii s vodíkovými technológiami a obnoviteľnými zdrojmi energie. Nadobudnuté poznatky mali slúžiť ako základ pre návrh ekologickejšieho zdroja elektrickej energie pri zachovaní ekonomických parametrov fosílnych palív.

Výskum sa sústredil na návrh 100 kWp stacionárneho modulárneho záložného zdroja energie, ktorý využíva obnoviteľné zdroje a vodíkové technológie, ako sú elektrolyzér a palivový článok. Kľúčovým aspektom bol vývoj efektívneho a udržateľného systému, ktorý optimalizuje využitie energie, zabezpečuje spoľahlivosť a predlžuje životnosť komponentov. Súčasťou výskumu bola detailná analýza, simulácia a optimalizácia fotovoltaických panelov, systémov skladovania energie a procesov elektrolyzy, pričom boli zohľadňované rôzne prevádzkové podmienky s cieľom dosiahnuť maximálnu efektivitu a stabilitu celého systému.

V prvom kroku bol vytvorený simulačný model navrhovaného systému s nízkym výstupným výkonom 80 Wp. Následne bol zostrojený aj fyzický model s výkonom 80 Wp. Primárnou úlohou zmenšeného modelu bolo overiť fyzickú realizovateľnosť vytvoreného konceptu. Okrem toho boli výsledky simulácií v prostredí Matlab Simulink využité pri výbere a optimalizácii komponentov reálneho systému, ako sú fotovoltaické panely, batérie, meniče a elektrolyzér. Zostavená simulačná schéma je schopná aproximovať stav systému a jeho komponentov v rôznych obdobiach roka. Bolo zistené, že takto nastavený a riadený systém je implementovateľný aj pri vyšších výkonových úrovniach, rádovo v stovkách kilowattov.

Na základe poznatkov zo simulačných cyklov pre jednotlivé premenné systému, ako sú stav nabitia batérie, vyprodukovaný výkon, požiadavky na výkon záťaže a podobne, bol zostavený fyzický model. Fyzický model umožňuje distribúciu energetických tokov medzi komponentmi (fotovoltaika – batéria – elektrolyzér). Môže byť riadený prostredníctvom vytvoreného rozhrania v Matlabe alebo autonómne, pričom dáta sú odosielané a zobrazované v cloudovom úložisku. Zmenšený systém slúži ako modelový príklad realizovateľnosti reálneho zariadenia s výkonom 100 kWp.

Následne bola navrhnutá simulácia pre systém s výstupným výkonom 100 kWp a bola parametrizovaná na základe reálnych hardvérových komponentov, ako sú fotovoltaické panely, batérie, meniče a PEMEL. Keďže väčšina komerčných simulačných nástrojov sa zameriava iba na jednotlivé podsystémy samostatne, výhodou tohto návrhu je presný opis správania systému ako celku. Toto sa dá využiť pri implementácii systému v praxi, keď je v procese plánovania dôležité poznať jednotlivé toky energie, a tým aj správanie celého systému.

Hlavným prínosom dizertačnej práce je vytvorenie inovatívneho riešenie systémovej simulácie ekologickejšieho zdroja elektrickej energie využívajúceho obnoviteľné zdroje energie a vodíkové technológie pri zachovaní ekonomických parametrov fosílnych palív.

Čiastkové prínosy:

- Komplexná analýza, modelovanie a simulácia interoperability kľúčových komponentov moderných energetických systémov: obnoviteľných zdrojov energie (OZE), batériových systémov a vodíkových technológií.
- Optimalizácia stacionárneho systému pre výrobu a uskladnenie vodíka s dôrazom na zlepšenie ekologických aspektov prevádzky, robustnosť a ekonomickosť.
- Návrh ekologickejšieho zdroja elektrickej energie pri zachovaní ekonomických parametrov fosílnych palív.
- Systémová simulácia energetickej bilancie pri ľubovoľných zaťaženiach kombinovaného zdrojového systému implementovateľný na systémy rádovo v stovkách kilowattov.

Literatúra

- [36] CELLEVIA POWER CL-SM20M datasheet, [Online]. <https://www.tme.com/Document/2964d249f7848aa26acb34bc60fbc313/CL-SM20M.pdf>.
- [37] Burin Yodwong, Proton Exchange Membrane Electrolyzer Emulator for Power Electronics Testing Applications, 192021. https://www.researchgate.net/publication/349970605_Proton_Exchange_Membrane_Electrolyzer_Emulator_for_Power_Electronics_Testing_Applications.
- [39] Tevfik Yigit, Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system, ScienceDirect, 2016.
- [40] Horizon Fuel Cell Europe, „<https://www.horizoneducational.com/>“, Horizon Fuel Cell Europe, s.r.o, 2023. [Online]. <https://www.horizoneducational.com/hydrofil-pro/p1221>.
- [41] H-500 Fuel Cell Stack User Manual. [online]. <https://www.fuelcellstore.com/manuals/horizon-pem-fuel-cell-h-500-manual.pdf>
- [42] Fuel Cell Stack. [online]. <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>
- [47] Mathworks, „mathworks.com“, The MathWorks, Inc., 1994-2023. [Online]. <https://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html>.
- [48] Talesun, 2021. [Online]. https://www.talesun.com/en/wp-content/uploads/2020/12/BISTAR_TP7F78M-TP7F78MH_10BB_210428_EN.pdf
- [49] Khan, S. S., Shareef, H., & Ibrahim, A. A. (2021). Improved semi-empirical model of proton exchange membrane fuel cell incorporating fault diagnostic feature. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(6), 1566–1573. <https://doi.org/10.35833/mpce.2019.000179>
- [50] Nel ASA, 2023. [Online] <https://nelhydrogen.com/resources/c-series-spec-sheet>
- [51] Ulf Bossel, „Energy and the Hydrogen Economy“, ABB Switzerland Ltd., Baden-Dättwil, 2020.
- [52] Nekkers, „Hydrogen buses on the Veluwe“, [Online]. https://www.h2nodes.eu/images/docs/20200416_status_verslag_2BP_Hydrogen_buses_on_the_Veluwe_Eng_.pdf.
- [53] Mehrdad Ehsani, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Florida: CRC Press LLC, 2005.
- [54] DriveCAT: Drive Cycle Analysis Tool, [Online]. <https://www.nrel.gov/transportation/drive-cycle-tool>

Zoznam publikácií autora

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- V2_01 ČÁPKOVÁ, Romana [40 %] - KOZÁKOVÁ, Alena [30 %] - MINÁR, Martin [15 %] - ONDREJČKA, Kristián [15 %]. Robust QFT-based control of the DC motor laboratory model. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : 30th International Conference. Velké Karlovice, Czech Republic. January 29-February 1, 2020*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2020, [6] s. ISBN 978-1-7281-4381-1. V databáze: IEEE: 9039892 ; WOS: 000753938900044 ; SCOPUS: 2-s2.0-85083107510 ; DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039892. Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_02 FERENCEY, Viktor [34 %] - STROMKO, Michal [33 %] - ONDREJČKA, Kristián [33 %]. Thermal analysis of the air-cooled PEM fuel cell. In *KOKA 2019 : proceedings of the 50th International Scientific Conference of Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Motor Vehicles and Internal Combustion Engines Research*. 1. vyd. Brno : MENDEL, 2019, S. 205-214. ISBN 978-80-7509-668-5. Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_03 MIKLE, Dávid [34 %] - BAŤA, Martin [33 %] - ONDREJČKA, Kristián [33 %]. Validation of vehicle model. 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. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_04 MINÁR, Martin [40 %] - GOGA, Vladimír [40 %] - ČÁPKOVÁ, Romana [5 %] - ONDREJČKA, Kristián [5 %] - MURÍN, Justín [10 %]. Basic parameters of coiled fishing line actuator. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : 30th International Conference. Velké Karlovice, Czech Republic. January 29-February 1, 2020*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2020, [4] s. ISBN 978-1-7281-4381-1. V databáze: IEEE: 9039870 ; WOS: 000753938900022 ; SCOPUS: 2-s2.0-85083104051 ; DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039870. Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_05 ONDREJČKA, Kristián [34 %] - FERENCEY, Viktor [33 %] - STROMKO, Michal [33 %]. Modeling of the air-cooled PEM fuel cell. In *PDeS 2019 : 16th IFAC conference on programmable devices and embedded systems. High Tatras, Slovakia. October 29-31, 2019*. 1. vyd. Laxenburg : IFAC, 2019, S. 98-105. ISSN 2405-8963. V databáze: DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.740 ; WOS: 000507495200018 ; SCOPUS: 2-s2.0-85081569028. Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_06 ONDREJČKA, Kristián [40 %] - ČÁPKOVÁ, Romana [15 %] - MINÁR, Martin [15 %] - HUBA, Mikuláš [30 %]. Experimental modelling of proton exchange membrane fuel cell voltage losses. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj] : 30th International Conference. Velké Karlovice, Czech Republic. January 29-February 1, 2020*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2020, [5] s. ISBN 978-1-7281-4381-1. V databáze: IEEE: 9039883 ; WOS: 000753938900035 ; SCOPUS: 2-s2.0-85083115356 ; DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039883. Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_07 ONDREJČKA, Kristián [50 %] - HUBA, Mikuláš [50 %]. Simulation of PEM fuel cell voltage losses. In *ELITECH'20 [elektronický zdroj] : 22nd Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, [5] s. ISBN 978-80-227-5001-1. Kategória publikácie do 2021: AFD

- V2_08 ONDREJIČKA, Kristián [34 %] - PUTALA, Rastislav [33 %] - MIKLE, Dávid [33 %]. Fuel cells as backup power supply for production processes. 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, [6] s. ISBN 978-1-6654-8775-7. V databáze: DOI: 10.1109/KI55792.2022.9925936 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142031350 ; IEEE: 9925936. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_09 ULIČNÝ, Michal Miloslav [51 %] - KUTIŠ, Vladimír [24 %] - SZABÓ, Bence [3 %] - ONDREJIČKA, Kristián [22 %]. 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

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

- V3_01 FERENCEY, Viktor [34 %] - STROMKO, Michal [33 %] - ONDREJIČKA, Kristián [33 %]. Contribution to thermal analysis of the air-cooled PEM fuel cell. In *Information Technology Applications*. Vol. 8, No. 1 (2019), s. 3-20. ISSN 1338-6468. Kategória publikácie do 2021: ADF
- V3_02 ONDREJIČKA, Kristián [51 %] - GOGA, Vladimír [20 %] - BERTA, Šimon [10 %] - ULIČNÝ, Michal Miloslav [10 %] - KUTIŠ, Vladimír [9 %]. 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

Štatistika: kategória publikačnej činnosti od 2022

V2	Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka	9
V3	Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu	2
Súčet		11

Štatistika: kategória ohlasov od 2022

1 Citácia v publikácii registrovaná v citačných indexoch			16
	Zahraničné		16
Súčet			16

Zdroje metrik: Clarivate, Scopus a Journalmetrics

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 procesu prekladu do slovenského jazyka a na zabezpečenie gramatickej korektúry rukopisu. Ich primárnym cieľom bolo zvýšenie jazykovej presnosti a zlepšenie celkovej zrozumiteľnosti textu. Počas celého procesu bol kladený dôraz na zachovanie pôvodného zámeru autora a udržanie vysokej odbornej úrovne práce.

Preklad a gramatická úprava boli realizované s pomocou týchto AI nástrojov:

- OpenAI (2025), ChatGPT 4o
- Google (2025), Gemini 2.5 Flash

Prílohy

Príloha A:

Simulačný model zmenšeného systému s výkonom 80 Wp (.m-file; .slx; .prj)

Príloha B:

Riadiaci program fyzického zmenšeného modelu (.slx)

Príloha C:

Simulačný model systému s výkonom 100 kWp (.m-file; .slx; .prj)

Príloha D:

Vstupné hodnoty modelu, výstupné hodnoty merania a porovnanie hodnôt modelu a merania (.xlsx)