

---

# Identifikácia problémov s nerovnomerným rozložením teplôt v rámci batériového racku prostredníctvom CFD prístupu

---

**Zoltán Csuka, Ing., PhD.\***

ZTS – VÝSKUM A VÝVOJ, a.s.

Ul. Lieskovec 598/75, 018 41 Dubnica nad Váhom, Slovenská republika.

E-mail: [zoltan.csuka@ztsvav.eu](mailto:zoltan.csuka@ztsvav.eu), Tel.: +421 907 991 022

**Peter Hlbočan, Ing. PhD.**

ZTS – VÝSKUM A VÝVOJ, a.s.

Ul. Lieskovec 598/75, 018 41 Dubnica nad Váhom, Slovenská republika.

E-mail: [peter.hlbočan@ztsvav.eu](mailto:peter.hlbočan@ztsvav.eu), Tel.: + 421 905 278 994

## Identification of nonuniform temperature distribution problems within a battery rack using a CFD approach

**Abstract:** This article focuses on the issue of uneven temperature distribution within a battery rack, which significantly influences the performance and lifespan of second-life batteries. We analyze the contributing factors to this imbalance and propose optimized solutions. Numerical simulations are conducted under various operating conditions to identify key parameters affecting thermal uniformity. Based on the acquired data, we present strategies for effective temperature distribution within battery packs and racks, thereby enhancing the stability and reliability of the entire energy system. This study would have significant implications for the industrial deployment of battery technologies and their optimal utilization in high-performance energy systems.

**Keywords:** lithium-ion battery, second life battery, battery rack, battery storage, temperature distribution.

---

## ÚVOD

S narastajúcim dopytom po elektrickej energii a potrebou udržateľných energetických riešení sa pozornosť čoraz väčšmi upína na sekundárne využitie vyradených *Li-ion* batérií, ktoré predstavujú určité environmentálne riziko. Takzvané *second-life* batérie boli vyradené predovšetkým zo stále väčšieho počtu elektromobilov, z dôvodu poklesu ich vlastnej kapacity, môžu byť naďalej využívané ako súčasť úložiska elektrickej energie, a to najmä v kombinácii so zdrojmi obnoviteľnej elektrickej energie, akými sú napríklad aj malé vodné elektrárne alebo fotovoltické elektrárne. Batériové úložiská predstavujú komplexný systém, zložený z rôznych prvkov, ktoré spoločne zabezpečujú efektívne skladovanie a distribúciu elektrickej energie do elektrifikačnej siete. Súčasťou tohto systému je aj tepelný manažment, ktorý predstavuje kľúčový aspekt pri optimalizácii výkonu a životnosti *second-life Li-ion* batérií. Nerovnomerné rozloženie teploty medzi batériovými článkami v takomto systéme môže viesť k závažným problémom, vrátane skrátenia ich životnosti a zníženia ich výkonnosti. Je teda potrebné analyzovať prejavy nerovnomerného rozloženia teploty a identifikovať potenciálne hrozby, ktoré s tým súvisia. Negatívnymi

javmi ku ktorým môže dôjsť v dôsledku nehomogénneho odvádzania tepla, je napríklad prehrievanie niektorých článkov a následne ich predčasná degradácia, v najhoršom prípade však môže dôjsť k javu tzv. „*Thermal Runaway*“, ktorý končí požiarom alebo explóziou. Je teda dôležité aplikovať určité opatrenia a riešenia na optimalizáciu kontajnerových batériových úložísk, resp. ich častí tzv. batériových rackov a packov za cieľom zabezpečenia rovnomerného rozloženia teploty čím sa maximalizuje výkon a životnosť celého systému [1-4].

V prípade, že niektoré batérie alebo konkrétnejšie články sú častejšie až trvalo prehrievané než ostatné, vznikajú rozdiely v rýchlosti chemických reakcií. Tento jav následne spúšťa nežiaduce reakcie, ako je napríklad rast dendritov na anóde a tiež aj degradačné procesy na katóde daného článku. Dochádza teda k nerovnomernému starnutiu článkov a k postupnému poklesu ich kapacity a výkonnosti. Preto je optimálny návrh chladiaceho systému a teda aj konštrukčného návrhu úložiska a jeho častí kritickou úlohou za účelom minimalizácie degradačných procesov a zabezpečenie dlhodobiejšieho a stabilnejšieho výkonu [5, 6, 8].

V snahe optimalizovať návrh batériových úložísk a ich časti akými sú napríklad batériové packy alebo batériové racky a tiež predchádzať nerovnomernému rozloženiu teplôt je často využívaný prístup *CFD* numerických výpočtov (*Computational Fluid Dynamics*). *CFD* numerické výpočty dokážu okrem iného analyzovať tok tepla a prúd vzduchu v batériovom racku, umožňujúc identifikáciu potenciálnych nedokonalne chladených miest. Prostriedky *CFD* dokážu simulovať rôzne scenáre prevádzky a zohľadňovať vplyv rôznych faktorov, ako sú konštrukčné zmeny, rýchlosť prúdenia vzduchu, teplota okolia a ďalšie. Na základe výsledkov z numerických výpočtov je možné navrhnúť úpravy resp. optimalizačné kroky za účelom zlepšenia homogenity teplotného poľa a tiež aj maximalizácie efektivity chladenia a minimalizácie potenciálnej degradácie batérií [7, 10].

V príspevku sú prezentované niektoré prípady identifikovaných problémov s neoptimálnym chladením batériových modulov chladiacim médium a s nehomogénnym rozložením teplotného poľa medzi jednotlivými batériovými modulmi. Na základe výsledkov z *CFD* numerických výpočtov je možné navrhnúť optimalizačné kroky, ktoré predstavujú riešenia pre identifikované problémy.

## 1 POPIS NUMERICKÉHO MODELU

Numerické *CFD* výpočty boli realizované v softvérovom prostredí *ANSYS 2022R1*, ako aj tvorba geometrie a numerickej siete.

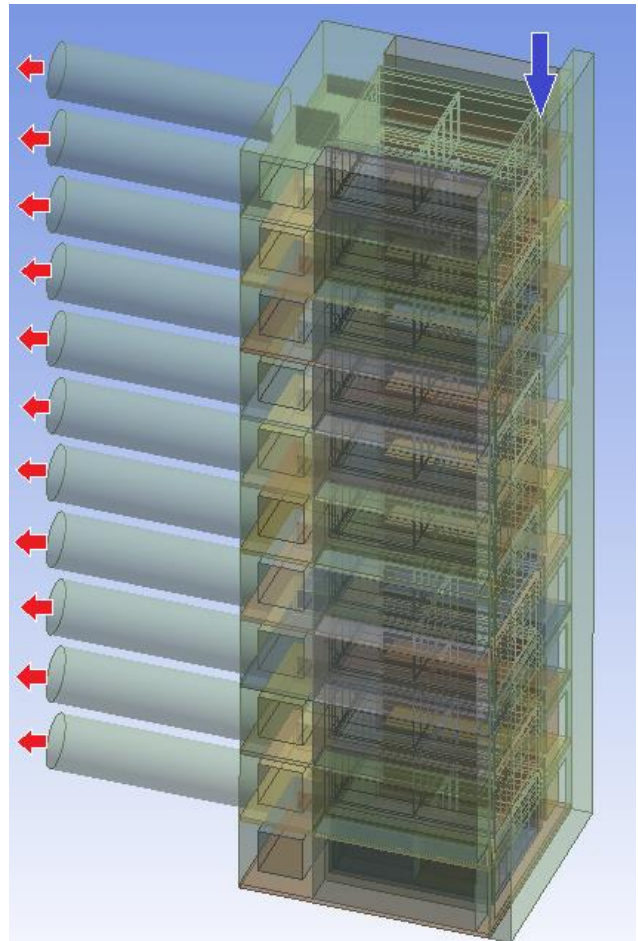
Aplikované boli rôzne idealizácie, či už idealizácia geometrie batériových packov a tiež aj rackov. Geometria bola idealizovaná na základe zachovania najpodstatnejších komponentov racku, boli tiež aplikované rôzne tvarové zjednodušenia pre optimálne generovanie numerickej siete.

Určitú idealizáciu predstavuje okrem iného aj zanedbanie sálavej zložky generovaného tepla, vzhľadom pre výrazne zvýšené nároky na výpočtový výkon a tiež aj z dôvodu relatívne nízkych rozdielov medzi teplotou okolia a výslednou teplotou vonkajších stien batériových modulov

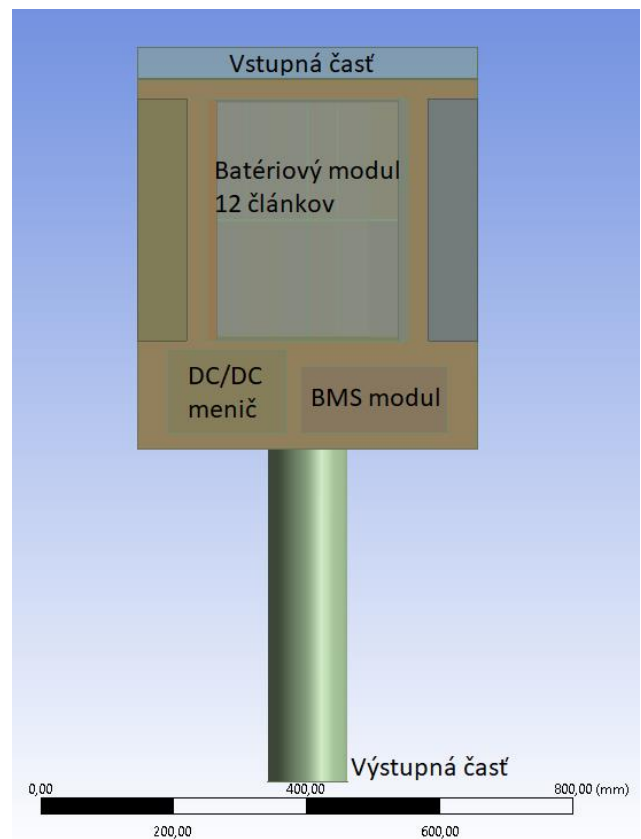
Nižšie uvedený obrázok znázorňuje zjednodušený 3D model racku s 11 batériovými packmi so vstupom chladiaceho média na vrchu. Pre realizáciu simulácie bolo potrebné vytvoriť „negatív“ objemu vyplneného vzduchom, teda z plného objemu „odčítať“ 3D model racku. Táto operácia bola realizovaná v prostredí *ANSYS Design Modeller 2022R1*.

Zostavenie numerického modelu bolo v súlade so zdrojom [9].

Priestor, v ktorom je rack s 11 batériovými packmi umiestnený, je vyplnený médium.



Obr. 1. Idealizovaná geometria batériového racku



Obr. 2. Popis častí batériového packu

V tomto prípade sa jedná o vzduch, ktorého vlastnosti korešponujú s idealizovaným plynom s konštantnými vlastnosťami nezávislými od zmeny teploty (hustota, tepelná kapacita, tepelná vodivosť, viskozita, mólová hmotnosť a iné). Materiál DC/DC meničov a BMS modulov bol definovaný ako hliník, konkrétne sa jednalo o plný blok s konštantnými materiálovými vlastnosťami nezávislými od zmeny teploty. Rovnako bol definovaný aj materiál konštrukcie racku, avšak ako materiál bola aplikovaná oceľ. Materiál článkov bol definovaný ako tzv. aktívny materiál, teda plný blok s konštantnými materiálovými vlastnosťami na základe dostupných podkladov.

Tab. 1. Okrajové podmienky a použité numerické modely

Okrajové podmienky		
Zóna	Typ	Vlastnosti
Vstup	Pressure-Outlet	$P = 1 \text{ atm}$ , $T_{backflow} = 293,15 \text{ K}$
Výstup	Velocity-Inlet	$c = -0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ $c = -2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ $T = 293,15 \text{ K}$
Steny vonkajšie	Wall	Free Stream Temperature $T = 293,5 \text{ K}$
Steny vnútorné	Wall	Coupled
Tepelný výkon jednotlivých modulov		
Popis	Tepelný výkon	Tepelný výkon·m <sup>-3</sup>
Li-ion modul	50 W	2 892 W·m <sup>-3</sup>
DC/DC menič	150 W	68 182 W·m <sup>-3</sup>
BMS modul	30 W	26 667 W·m <sup>-3</sup>
Ostatné		
Energetické rovnice	aktívne	-
Model turbulencie	$k-\omega$ SST	-
Diskretizácia - Energy	Second Order	-
Sálanie (Radiation)	neaktívne	-

Tepelný výkon, resp. množstvo odpadového tepla za jednotku času generovaný batériovými modulmi nebol v danom prípade iniciovaný chemickými reakciami a vlastným odporom článkov, ale bol pevne definovaný na základe dostupných podkladov pri známych podmienkach prevádzky. Rovnako bol pevne definovaný tepelný výkon DC/DC meničov a BMS modulov. Prítomnosť ventilátorov na výstupoch z batériových packov, ktoré vytvárajú prisávajú chladiaci vzduch do priestorov packov bola nahradená okrajovou podmienkou - velocity-inlet (obr. 1, červené šípky), kde sa definovala rýchlosť prúdenia s opačným znamienkom pre dosiahnutie

opačného smeru prúdenia, teda prisávania vzduchu cez vstup do racku vyznačený na obr. 1, modrou šípkou.

Za účelom vzniku rýchlostného profilu bola zóna výstupu patrične predĺžená. Okrem toho bolo potrebné definovať na Vstupe do racku okrajovú podmienku - pressure-outlet s definíciou parametra Backflow Temperature, čo predstavuje teplotu prisatého vzduchu v prípade prúdenia s opačným smerom. Zhrnutie definovaných okrajových podmienok, tepelných výkonov jednotlivých modulov a podstatné nastavenia numerického modelu sú popísané v tab. 1.

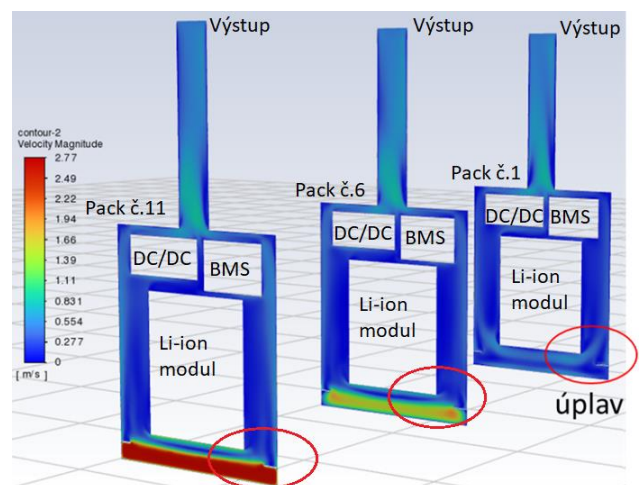
## 1.1 Numerická sieť

Numerická sieť obsahovala v závislosti od konkrétnej verzie konceptuálneho riešenia konštrukcie batériového racku od 45 do 82 mil. elementov typu polyhedra a hexahedra. Numerická sieť bola generovaná automaticky prostredníctvom ANSYS Fluent Meshing 2022R1, pričom boli vhodne zvolené lokálne veľkosti stenových elementov jednotlivých častí batériového packu, rovnako boli vhodne nastavené medzné vrstvy pri obtekaných pevných stenách a ďalšie nastavenia numerickej siete na základe vedomostí a skúseností s tvorbou numerických sietí. Taktiež bola vykonaná štúdia GIT (Grid Independence Test), kde bol analyzovaný vplyv veľkosti elementov na výsledky povrchových teplôt, na základe čoho bola zvolená optimálna veľkosť elementov za účelom minimalizácie výpočtových časov.

## 2 IDENTIFIKÁCIA PROBLÉMOV

### 2.1 Problém č. 1

Prostredníctvom grafického znázornenia rozloženia rýchlosti v rôznych rezových rovinách XY pozdĺž osi Y (obr. 3), bol identifikovaný nasledovný problém.

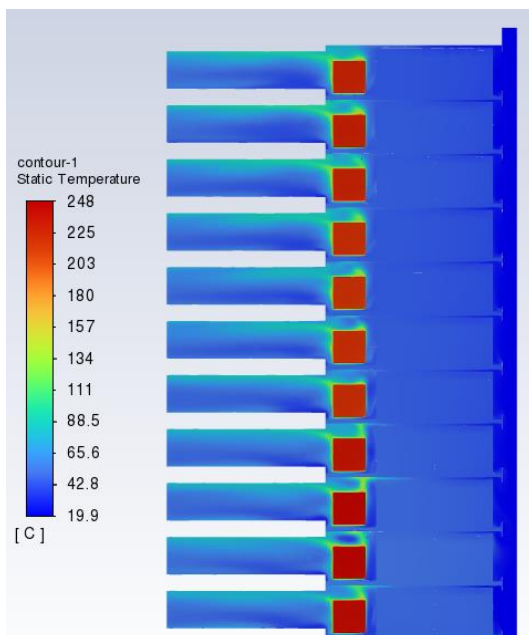


Obr. 3. Rozloženie rýchlosti v rezových rovinách XZ pozdĺž vertikálnej osi (pohľad na batériový rack zhora)

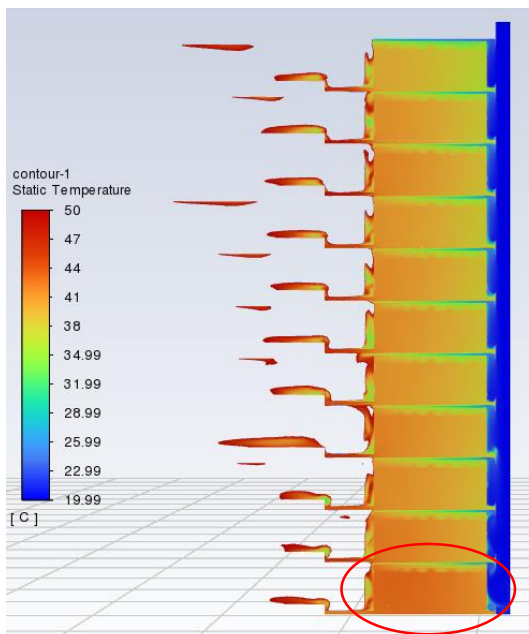
Vzduch vstupujúci do batériového packu obteká batériový modul pričom vzniká výrazný „úplav“, teda predovšetkým bočné steny ale aj zadná stena modulu sú chladené s výrazne nižšou efektívnosťou, keďže vzduch s vyššou rýchlosťou prúdi „ďalej“ od stien batériového modulu.

## 2.2 Problém č. 2

Na základe analýzy grafického znázornenia rozloženia teplôt v rezovej rovine YZ (obr. 4) a v znížených rozmedziach teploty ( $0 \div 50^\circ\text{C}$ ) (obr. 5), bol identifikovaný problém s nadmerným prehrievaním batériového modulu umiestneného v spodnej časti batériového racku (Pack č. 1).



Obr. 4. Rozloženie statickej teploty v rezovej rovine XY v osi batériového racku (pohľad na batériový rack z boku)



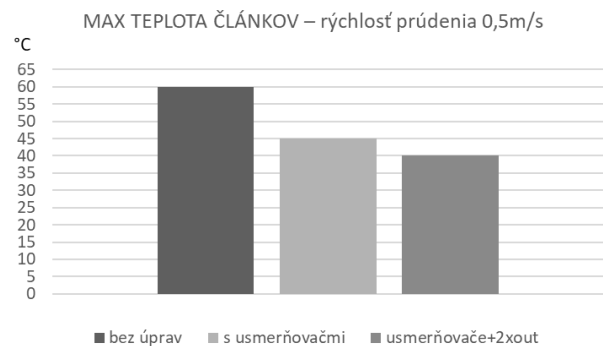
Obr. 5. Rozloženie statickej teploty v rezovej rovine XY v osi batériového racku (pohľad na batériový rack z boku), pri rozmedziach teplôt od  $0^\circ\text{C}$  do  $50^\circ\text{C}$ .

Príčinou prehrievania tohto modulu je absencia obtekajúceho vzduchu spodnej časti spomínaného batériového packu.

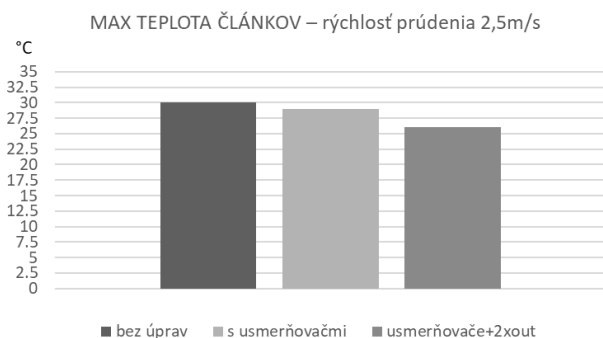
## 3 POROVNANIE VÝSLEDKOV PO APLIKOVANÍ OPTIMALIZÁCIÍ

V predchádzajúcej kapitole uvedené identifikované problémy boli odstránené vhodnými úpravami konštrukčného návrhu batériového modulu a batériového racku. Úpravami boli znížené maximálne teploty batériových článkov a tiež bolo dosiahnuté výrazne homogénnejšie rozloženie teplôt medzi jednotlivými článkami a tiež medzi jednotlivými batériovými modulmi.

Porovnanie maximálnych teplôt článkov pred a po jednotlivými zmenami je graficky vyobrazené na obr. 6. Je možné všimnúť si markantný rozdiel v maximálnych teplotách v prípade rýchlosti prúdenia vzduchu  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na úrovni  $20^\circ\text{C}$ . V prípade rýchlosti prúdenia vzduchu  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (obr. 7), je tento rozdiel výrazne nižší z dôvodu vyššieho prietoku obtekaného vzduchu a teda aj z vyššieho množstva odvádzaného tepla a predstavuje hodnotu  $4^\circ\text{C}$ .



Obr. 6. Porovnanie výsledkov maximálnych teplôt článkov pre rýchlosť  $c = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 7. Porovnanie výsledkov maximálnych teplôt článkov pre rýchlosť  $c = 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Vo finálnom návrhu je však nutné brať v úvahu spotrebu elektrickej energie ventilátorov ktoré budú zabezpečovať chod chladiaceho systému batériového racku resp. celého úložiska. Optimálna teplota pre prevádzku *Li-ion* batériových článkov býva spravidla do  $50^\circ\text{C}$ , tepelný manažment batériového systému preto musí zabezpečovať variabilitu rýchlosti

prúdiaceho vzduchu pre každý jeden batériový pack samostatne.

## ZÁVER

Riešenie problémov spojených s nerovnomerným rozložením teplôt a prehrievaním *Li-ion* batérií v batériových úložiskách je vysoko dôležité v opačnom prípade môže dôjsť k značnému skráteniu životnosti a zníženiu výkonu batérií, čo má negatívny vplyv na efektívnosť celého batériového úložiska. Optimálny konštrukčný návrh batériových rackov a packov je kľúčovým prvkom pre udržanie optimálnej prevádzky batérií a minimalizáciu degračných procesov. V kontexte optimalizácie batériových rackov je využitie *CFD* simulácií neoceniteľným nástrojom. Poskytujú detailný prehľad o toku tepla a prúdení vzduchu v systéme. Identifikácia nedokonale chladených miest a optimalizácia rozloženia teploty môže byť realizovaná prostredníctvom numerických výpočtov, vďaka čomu je možné navrhovať efektívnejšie konštrukčné riešenia s minimalizáciou potreby experimentálneho testovania. S dôkladne navrhnutými batériovými rackmi, ktoré sú optimalizované vďaka *CFD* simuláciám, môžu *second-life* batériové úložiská spoľahlivo fungovať, maximálne využívať zostávajúcu kapacitu *second-life* batérií pochádzajúcich z elektromobilov a predstavovať stabilné riešenia uskladňovania elektrickej energie pre obnoviteľné zdroje energie. V tomto kontexte sa nevyužitá kapacita batérií stáva cenným aktívom, ktoré prispieva k udržateľnosti energetických systémov a rozvoju obchodnej sféry pre *second-life Li-ion* batérie.

## Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Regenerácia použitých batérií z elektromobilov / *Regeneration of used batteries from electric vehicles, ITMS2014+: 313012BUN5*, ktorý je súčasťou významného projektu spoločného európskeho záujmu (IPCEI) z názvom *European Battery Innovation v operačnom programe Integrovaná infraštruktúra, kód výzvy: OPII-MH/DP/2021/9.5-34*, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## LITERATÚRA

[1] LI, J. - ZHU, Z. (2014): *Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles*, Department of Applied Mechanics Division of Vehicle

*Engineering & Autonomous Systems Road Vehicle Aerodynamics and Thermal Management*. Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden.

[2] ALI, H.A.A. - ABDELJAWAD, Z.N. (2020): *Thermal management technologies of lithium-ion batteries applied for stationary energy storage systems, Investigation on the thermal behavior of Lithium-ion batteries*. School of Business, Society and Engineering, Mälardalens University.

[3] MOGHADDAM, S.M.H. (2018): *Designing battery thermal management systems (BTMS) for cylindrical Lithium-ion battery modules using CFD*. KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology: TRITA-ITM-EX 2018:636 SE-100 44.

[4] FRANK, K. - QASEMI, R. - SAMVIN, D. (2020): *Thermal Management of Lithium-Ion Battery Pack*, Product Development and Materials Engineering.

[5] MYLAUDY, S. R. - ANANTH, S. (2020): *Battery Thermal Management in Electrical Vehicle - Review Article*. In: IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 7 Issue 2, ISSN 2348-7968.

[6] CHUNYU, Z. - BEILE, Z. - YUANMING, Z. - SHUNYUAN, H. - TONGTONG, Y. - XIUFANG, L. (2020): *Hybrid Battery Thermal Management System in Electrical Vehicles: A Review*. In: *Energies*, 13, 6257; doi:10.3390/en13236257.

[7] MAMBAZHASSERI, D. A. - HAMILTON, D. - MANJUNATHA, K. N. - MINAKSHI, M. (2020): *Design, Development and Thermal Analysis of Reusable Li-Ion Battery Module for Future Mobile and Stationary Applications*. In: *Energies*, 13, 1477; doi:10.3390/en13061477.

[8] HENKE, M. - HAILU, G. (2020): *Thermal Management of Stationary Battery Systems: A Literature Review*. In: *Energies*, 13, 4194; doi:10.3390/en13164194.

[9] *ANSYS Fluent Theory Guide*, Release 2021 R1 (2021): ANSYS, Inc., Southpointe, 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317, ansysinfo@ansys.com, <http://www.ansys.com>.

[10] *Battery Energy Storage System (BESS) Design using Ansys Fluent - Rand Simulation Solutions Blog*. <https://blogs.rand.com/randsim/2021/07/battery-energy-storage-system-bess-design-using-ansys-fluent.html>.