

---

# Analýza vplyvu konštrukčného riešenia batériového packu na chladenie batérií počas prevádzky

---

**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, Tel.: + 421 905 278 994

**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, Tel.: + 421 907 991 022

## Analysis of the impact of the design solution of the battery pack on the cooling of the batteries during operation

**Abstract:** The contribution is focused on the analysis of some possible approaches to the design of air cooling of the battery pack. The battery pack is equipped with a separate fan. As part of the analysis, the influence of the location of the fan in the pack and the direction of the cooling air flow on the cooling effect and the temperature field during operation were assessed. The result of the analysis is a specific recommendation for the location of the fan in the battery pack and the design of the air flow direction.

**Keywords:** battery, air cooling, fan, design.

---

## ÚVOD

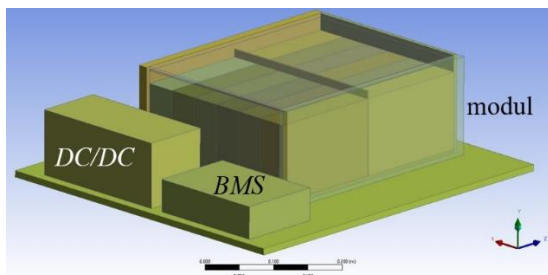
Konštrukčný návrh *Second Life Battery Storage (SLBS)* systému zahŕňa okrem iného návrh koncepcie a rozmerov batériových packov, ktoré sú zoradené do jednotlivých batériových rackov tvoriacich hlavné súčasti batériového úložiska. Pri konštrukčnom návrhu batériových packov (a rackov) je potrebné zohľadniť celý rad požiadaviek, pričom dôležitú skupinu požiadaviek tvoria požiadavky na zabezpečenie vyhovujúceho rozsahu prevádzkových teplôt batériových článkov (modulov). Prekročenie limitných hodnôt teploty smerom nahor môže spôsobiť poškodenie batérií (v extrémnom prípade vznietenie až explóziu) a smerom nadol spôsobuje okrem iného pokles kapacity batérií [1, 9]. Ďalšou podstatnou požiadavkou, dôležitou z hľadiska efektívnej prevádzky batériového úložiska, je zabezpečenie rovnomerného rozloženia teploty v batériových moduloch a batériových článkoch. Pri prevádzke batérií dochádza ku vzniku tepla v dôsledku elektrochemických reakcií, ďalej dochádza ku vzniku Joulovho tepla, prípadne ďalších druhov tepla (napr. polarizačné teplo) [2, 10]. Odvod vznikajúceho tepla teda chladenie batérií zabezpečuje chladiaci systém, pričom existuje veľké množstvo rôznych typov chladiacich systémov [3-6]. Konkrétny typ a konkrétne prevedenie chladiaceho systému vo

významnej miere ovplyvňuje výsledný chladiaci účinok a dosiahnutú mieru rovnomernosti teplotného poľa počas prevádzky. Správne zvládnutie problematiky návrhu spôsobu chladenia je teda jednou z kľúčových úloh na zabezpečenie efektívnej a bezpečnej prevádzky batériového systému.

V tomto príspevku bol uvažovaný batériový pack so systémom vzduchového chladenia batérií využívajúci nútenú konvekciu, pričom sa uvažovalo so zabezpečením prúdenia chladiaceho vzduchu do priestoru batériového packu prostredníctvom ventilátora. Chladiaci vzduch odoberá teplo vznikajúce v batériách, čím sa sám zohrieva. Ohriaty vzduch je po odvedení z priestoru batériového packu následne schladený klimatizačnou jednotkou tvoriacou súčasť batériového úložiska. Batériový pack uvažovaný v tomto príspevku je zobrazený na obr. 1. Uvažovaný batériový pack bol na účely tejto analýzy idealizovaný (boli vynechané tie komponenty, ktoré sú menej podstatné z hľadiska prenosov tepla a niektoré konštrukčné časti boli idealizované aj geometricky).

Pack pozostáva zo základovej dosky, batériového modulu s 12 batériovými článkami, DC / DC meniča a prvkov *Battery Management Systemu (BMS)*. Z dôvodu menšieho teplotného ovplyvnenia batériového modulu sa uvažovalo s tepelným

odizolovaním *BMS* s *DC/DC* meničom od základovej dosky. Okrem toho je batériový pack vybavený samostatným ventilátorom. Chladiaci vzduch prúdi (v pozdĺžnom smere) ponad základovú dosku okolo modulu (z bokov a ponad), *DC/DC* meniča a *BMS*. Nad batériovým modulom je vzduchová medzera, nad ktorou je umiestnený ďalší (susedný) batériový pack, ktorého základová doska zhora uzatvára chladiaci priestor daného packu. Po bočných stranách boli takisto uvažované pevné steny tvoriace bočné hranice priestoru pre prúdenie chladiaceho vzduchu. Ventilátor môže byť v princípe umiestnený na obidvoch čelných plochách batériového packu, pričom v obidvoch umiestneniach môže byť chladiaci vzduch ventilátorom buď nasávaný vŕhánaný smerom do packu alebo odsávaný smerom von z packu.



Obr. 1. Idealizovaná geometria batériového packu uvažovaného v analýze (vo vnútri modulu vidno idealizované články a prepážku, medzi článkami a horným vekom je vzduchová medzera).

V tomto príspevku sú prezentované výsledky analýzy vplyvu umiestnenia a orientácie ventilátora (od ktorej závisí smer prúdenia chladiaceho vzduchu) na chladiaci účinok a dosiahnutú rovnomernosť teplotného poľa. Analyzované bolo umiestnenie ventilátora pred batériovým modulom a za *BMS* s *DC/DC* meničom. V obidvoch prípadoch sa analyzoval prípad kedy je ventilátor orientovaný tak, že vŕhá (tlačí) vzduch smerom na batériový modul a prípad kedy ventilátor nasáva vzduch spoza modulu.

Z výsledkov analýzy vyplýva, aké umiestnenie a aká orientácia ventilátora je pri daných podmienkach najvýhodnejšia pre minimalizáciu teploty a dosiahnutie rovnomernosti teplotného poľa batériových článkov

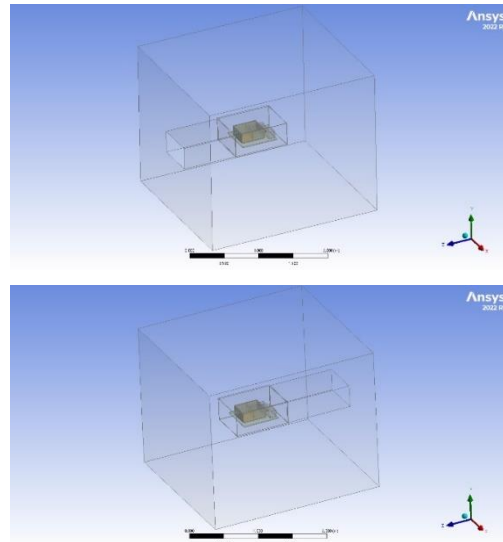
## 1 SIMULAČNÝ MODEL

Analýza bola uskutočnená s využitím simulačného softvéru *ANSYS 2022R1*. Detaily týkajúce sa matematického modelovania batériových systémov vrátane uplatnených rovníc sú uvedené napr. v prácach [7, 8, 11].

### 1.1 Výpočtová oblasť a výpočtová sieť

Celkový pohľad na uvažovanú výpočtovú oblasť vidno na obr. 2. Okrem samotného batériového packu bol vo výpočtovej oblasti zahrnutý aj priestor s okolitým vzduchom. Výpočtová sieť bola tvorená

*polyhedrálnymi* bunkami. Uplatnená výpočtová sieť obsahovala cca 16 miliónov buniek.



Obr. 2. Geometria výpočtovej oblasti s ventilátorom umiestneným pred batériovým modulom (hore) a výpočtová oblasť s ventilátorom umiestneným za *BMS* s *DC/DC* meničom (dolu).

### 1.2 Fyzikálne vlastnosti uvažovaných materiálov, rovnice popisujúce prúdenie a okrajové podmienky

Materiálové zloženie jednotlivých častí batériového packu bolo idealizované, pričom sa zohľadnili materiály, ktoré mali dominantný podiel na celkovom zložení. Fyzikálne vlastnosti jednotlivých materiálov ako aj okolitého vzduchu boli uvažované ako konštanty nezávislé od prevádzkových parametrov.

Riešené boli rovnica energie, *Navier-Stokesove rovnice* pre turbulentné prúdenia s modelom turbulencie *k- $\omega$  SST* a *rovnica continuity*. Prenos tepla sálaním je zanedbaný. Vzhľadom na pomerne malé rozdiely v povrchových teplotách batériového modulu a okolitého prostredia je chyba v dôsledku nezohľadnenia prenosu tepla sálaním pomerne malá.

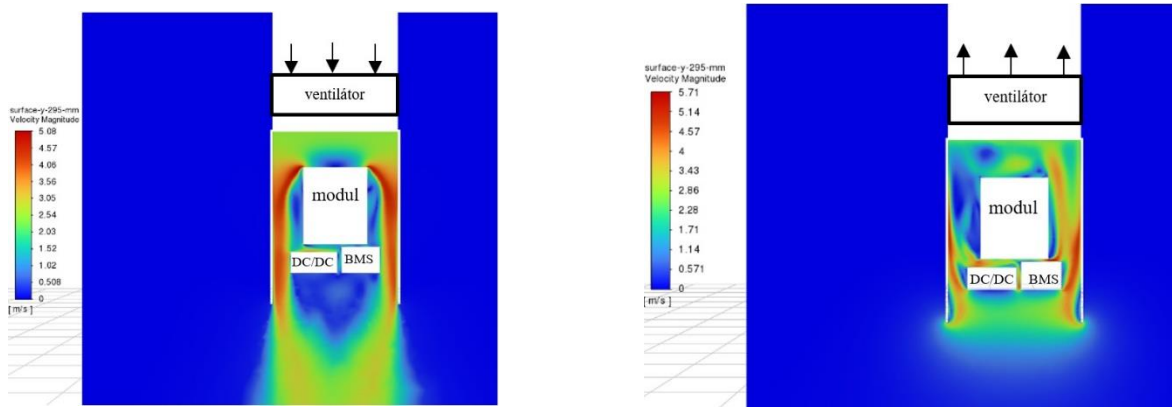
Namiesto riešenia elektrochemických reakcií a ďalších potenciálnych zdrojov tepla bol ako okrajová podmienka definovaný tepelný tok vznikajúci v každom batériovom článku (4 W na článok) a v *BMS* s *DC/DC* meničom. Hodnoty tepelných tokov boli definované ako konštanty nezávislé na okolitej teplote a ďalších prevádzkových parametroch.

Samotný ventilátor nebol v simulačnom modeli priamo zahrnutý. Namiesto ventilátora sa uvažovala rovná okrajová zóna, na ktorej bolo (ako okrajová podmienka) definované konštantné rozloženie rýchlosti prúdenia chladiaceho vzduchu. Rýchlosť prúdenia chladiaceho vzduchu bola uvažovaná  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Teplota chladiaceho vzduchu na vstupe ako aj teplota okolitého vzduchu bola uvažovaná  $20^\circ\text{C}$ . Výstupnou okrajovou podmienkou bola hodnota atmosférického tlaku.

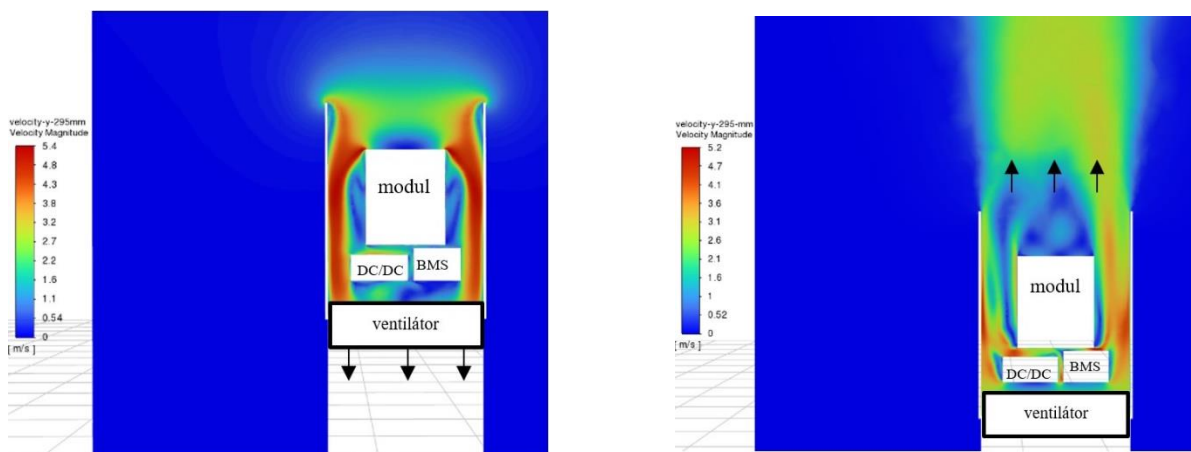
## 2 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Výsledkami jednotlivých simulačných výpočtov sú (okrem iného) tlakové polia, polia rýchlosti prúdenia chladiaceho vzduchu a teplotné polia (chladiaceho vzduchu a pevných stien celého packu). Na obr. 3 a obr. 4 vidno vypočítané rozloženia rýchlosti prúdenia chladiaceho vzduchu.

vypočítaných rozložení teploty boli pre všetky štyri analyzované alternatívy batériového packu stanovené hodnoty maximálnych teplôt batériových článkov a priemerné teploty vonkajších stien batériového modulu, ktoré sa dosiahnu počas prevádzky pri uvažovaných prevádzkových podmienkach. Na základe týchto hodnôt boli stanovené rozdiely medzi



Obr. 3. Rýchlosť prúdenia chladiaceho vzduchu: ventilátor tlačí vzduch smerom na modul (v poradí modul - BMS s DC/DC meničom) - vľavo, ventilátor nasáva vzduch spoza modulu (v poradí BMS s DC/DC meničom - modul) - vpravo. Šípky označujú hlavný smer prúdenia chladiaceho vzduchu



Obr. 4. Rýchlosť prúdenia chladiaceho vzduchu: ventilátor nasáva vzduch spoza modulu (v poradí modul - BMS s DC/DC meničom) - vľavo, ventilátor tlačí vzduch smerom na modul (v poradí BMS s DC/DC meničom - modul) - vpravo. Šípky označujú hlavný smer prúdenia chladiaceho vzduchu

Z týchto obrázkov je zrejmé, že štruktúra prúdenia a teda aj rozdielne rozdistribúovanie chladiaceho vzduchu vo vnútri batériového packu bude pre každé umiestnenie a orientáciu ventilátora zásadne iné. Tým dochádza ku rozdielnostiam v kinetike a intenzite prestupu tepla medzi batériovým modulom (BMS s DC/DC meničom) a okolím v prípade jednotlivých alternatív umiestnenia a orientácie ventilátora. To má za dôsledok rozdielne chladiace účinky ako aj rozdielnosti v homogenite teplotného poľa vo vnútri batériového modulu (obr. 5 až obr. 8). Na obr. 5 až obr. 8 vidno, že analyzované alternatívy batériového packu sa líšia rovnomernosťou rozloženia teploty vo vnútri batériového modulu ako aj maximálnymi dosahovanými teplotami batériových článkov. Z

maximálnou dosahovanou teplotou batériového článku a teplotou okolia resp. priemernou teplotou stien modulu. Hodnoty pre všetky štyri analyzované alternatívy batériového packu sú uvedené v tab. 1. Na obr. 5 až obr. 8 sú teploty modulu a dosky. Teploty zvyšných častí packu nie sú predmetom analýzy.

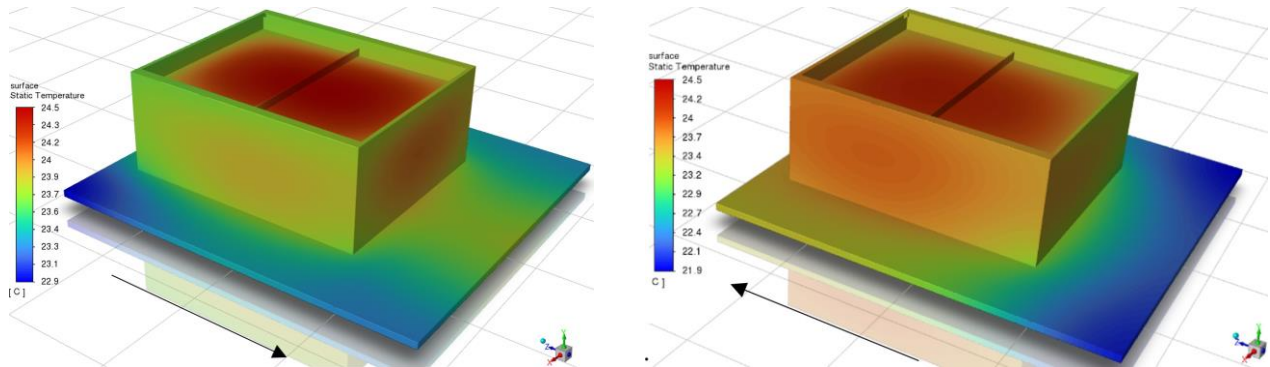
## ZÁVER

Výsledky CFD simulácie preukázali, že výsledné rozloženie teplotného poľa je ovplyvnené konkrétnym rozdistribúovaním prúdiaceho vzduchu (poľom rýchlosti prúdenia chladiaceho vzduchu), ktoré závisí od smeru prúdenia a od umiestnenia ventilátora.

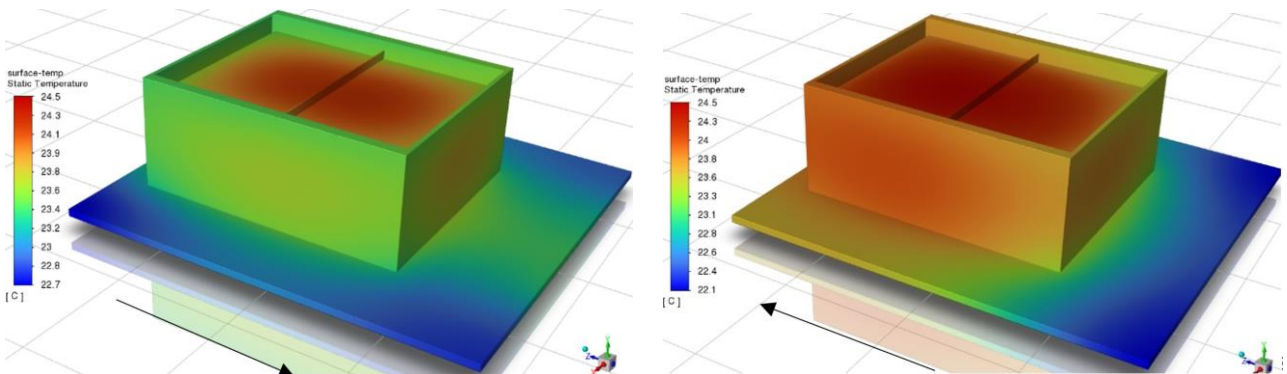


Tab. 1. Výsledky CFD simulácie. Uvažovaný stratový výkon 1 článku 4W, stredná rýchlosť prúdenia 2,5 ms<sup>-1</sup>, teplota okolia 20°C

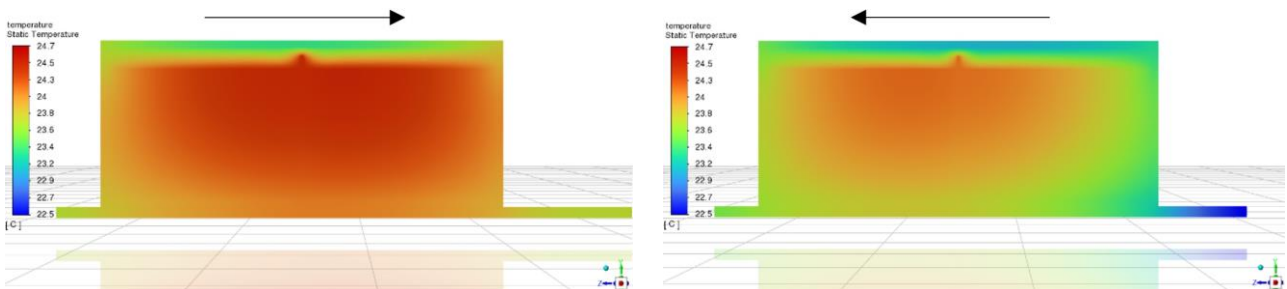
| Spôsob distribúcie vzduchu              | Ventilátor tlačí vzduch      | Ventilátor nasáva vzduch     | Ventilátor nasáva vzduch     | Ventilátor tlačí vzduch      |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Smer prúdenia (poradie)                 | modul -> BMS s DC/DC meničom | BMS s DC/DC meničom -> modul | modul -> BMS s DC/DC meničom | BMS s DC/DC meničom -> modul |
| Max teplota článku [°C]                 | 24,5                         | 24,2                         | 24,2                         | 24,5                         |
| Priemerná teplota plášťa [°C]           | 23,8                         | 23,5                         | 23,5                         | 23,8                         |
| ΔT voči teplote okolia [K]              | 4,5                          | 4,2                          | 4,2                          | 4,5                          |
| ΔT voči priem. teplote stien modulu [K] | 0,7                          | 0,7                          | 0,7                          | 0,7                          |



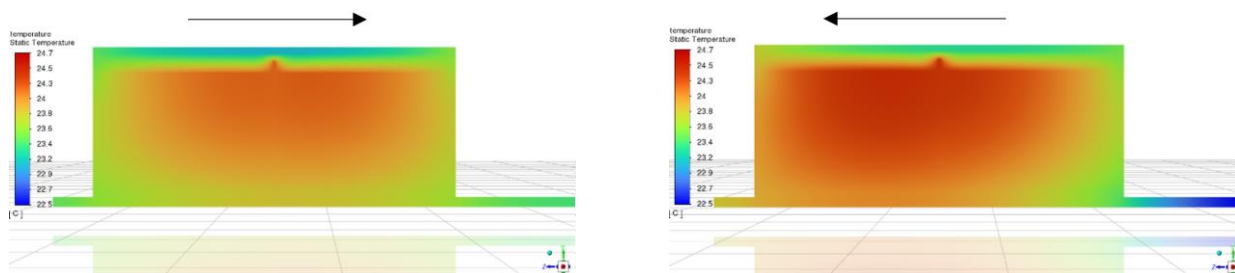
Obr. 5. Teplota (pevných častí modulu a základovej dosky): ventilátor tlačí vzduch smerom na modul (v poradí modul - BMS s DC/DC meničom) - vľavo, ventilátor nasáva vzduch spoza modulu (v poradí BMS s DC/DC meničom - modul) - vpravo. Šípky označujú hlavný smer prúdenia chladiaceho vzduchu



Obr. 6. Teplota (pevných častí modulu a základovej dosky): ventilátor nasáva vzduch spoza modulu (v poradí modul - BMS s DC/DC meničom) - vľavo, ventilátor tlačí vzduch smerom na modul (v poradí BMS s DC/DC meničom - modul) - vpravo. Šípky označujú hlavný smer prúdenia chladiaceho vzduchu



Obr. 7. Teplota (modulu a základovej dosky): ventilátor tlačí vzduch smerom na modul (v poradí modul - BMS s DC/DC meničom) - vľavo, ventilátor nasáva vzduch spoza modulu (v poradí BMS s DC/DC meničom - modul) - vpravo. Šípky označujú hlavný smer prúdenia chladiaceho vzduchu



**Obr. 8. Teplota (modulu a základovej dosky): ventilátor nasáva vzduch spoza modulu (v poradí modul - BMS s DC/DC meničom) - vľavo, ventilátor tlačí vzduch smerom na modul (v poradí BMS s DC/DC meničom - modul) - vpravo. Šípky označujú hlavný smer prúdenia chladiaceho vzduchu**

Nižšie maximálne teploty článkov boli dosiahnuté v prípadoch, ak ventilátor „nasáva“ chladiaci vzduch spoza batériového modulu ako v prípade, keď ventilátor „tlačí“ chladiaci vzduch smerom na batériový modul. Rozdiely medzi jednotlivými alternatívami sú však malé. Poradie v akom chladiaci vzduch obteká BMS s DC/DC meničom a batériový modul nie je z tohto hľadiska príliš podstatné. Zároveň platí, že viac rovnomerné teplotné pole bolo dosiahnuté v prípade, ak chladiaci vzduch nabiehal najskôr na batériový modul a následne na BMS s DC/DC meničom. Hodnota  $T$  voči strednej teplote stien modulu vyšla rovnako vo všetkých štyroch prípadoch.

Pri uvažovaných podmienkach je najviac výhodné umiestniť ventilátor tak, aby nasával vzduch spoza modulu v poradí modul – BMS s DC/DC meničom.

## 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] MYLAUDY, S. R. - ANANTH, S. (2020): *Battery Thermal Management in Electrical Vehicle - Review Article*, IJISSET – International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 7 Issue 2, ISSN 2348 -7968
- [2] FRANK, K. - QASEMI, R. - SAMVIN, D. (2020): *Thermal Management of Lithium-Ion Battery Pack*. In: Product Development and Materials Engineering
- [3] 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.

[4] 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.

[5] HENKE, M. - HAILU, G. (2020): *Thermal Management of Stationary Battery Systems: A Literature Review*. In: Energies.

[6] BHATTACHARJEE, A. - MOHANTY, K. R. - GHOSH, A. (2020): *Design of an Optimized Thermal Management System for Li-Ion Batteries under Different Discharging Conditions*. In: Energies.

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

[8] PACCHA-HERRERA, E. - CALDERÓN-MUÑOZ, W. R. - ORCHARD, M. - JARAMILLO, F. - MEDJAHER, K. (2020): *Thermal Modeling Approaches for a LiCoO<sub>2</sub> Lithium-ion Battery-A Comparative Study with Experimental Validation*. In: Batteries.

[9] 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.

[10] 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.

[11] *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>.