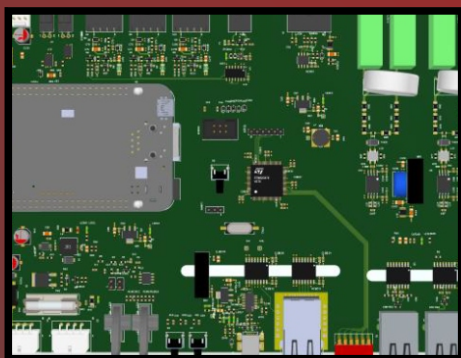
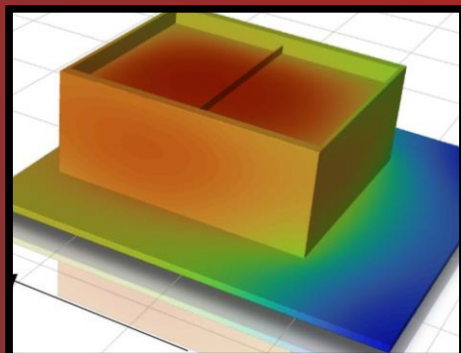
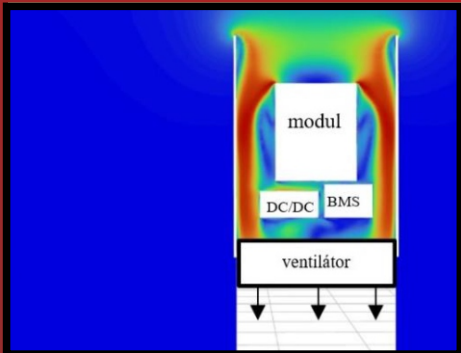
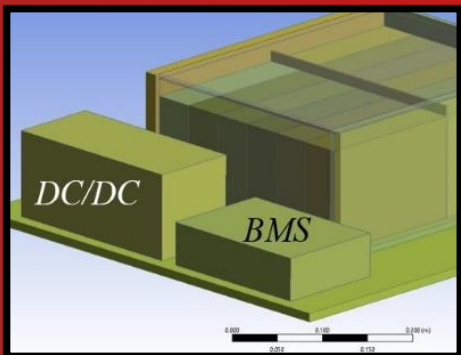
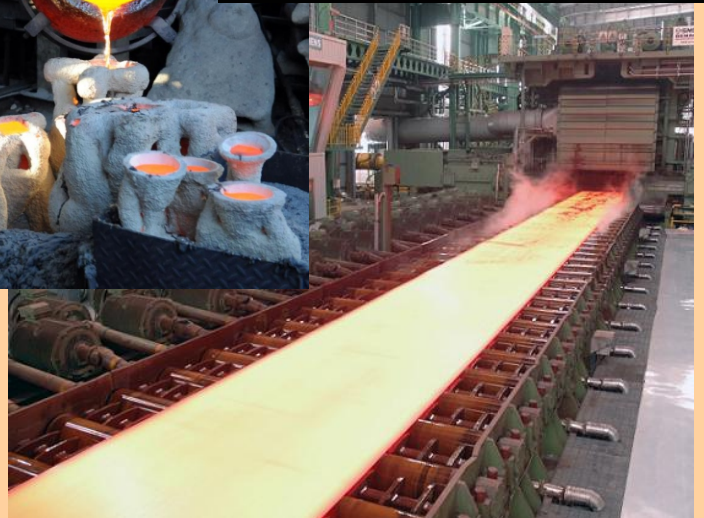




ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta



TECHNOLÓG



TECHNOLÓG

Vychádza spravidla dvakrát ročne. Publikuje vedecké, výskumné, odborné, teoretické práce, návody, štúdie, recenzie, informácie o spracovaní technických materiálov. Zameriava sa na uverejňovanie príspevkov a prác venujúcich sa otázkam z oblasti trieskových a beztrieskových technológií, fyzikálnych princípov nekonvenčných technológií, technologickosti konštrukcií nástrojov, ekonomike výrobného procesu, ekologizácii, spracovaniu odpadov. Takisto publikuje práce o strojoch, nástrojoch, prípravkoch a meracej technike pre oblasť mechanických technológií, výsledkoch výskumu vo sfére informačných technológií v technologickej oblasti. Uverejňuje práce o histórii a vývine mechanických technológií.

Časopis zverejňuje príspevky v jazykoch: slovenskom, českom, poľskom, ruskom, anglickom a nemeckom.

Všetky príspevky sú recenzované dvoma nezávislými recenzentmi a redakcia si vyhradzuje právo na ich redakčnú úpravu. Nepreberá sa zodpovednosť za prípadné škody spôsobené použitím úkonov, metód, produktov, ideí, návodov a pod. publikovaných autormi príspevkov.

Evidenčné číslo MK SR-2800/08, EV 10/22/EPP

ISSN 1337-8996, Online ISSN 2730-0501

Adresa redakcie:

Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Telefón: 041-513 2764

e-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

Vydáva Žilinská univerzita v Žiline v EDIS-vydavateľstve UNIZA

Univerzitná HB, 010 26 Žilina, IČO 00 397 563

šéfredaktor - editor in chief:

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD.

výkonný redaktor - executive editor:

doc. Ing. Ján Dižo, PhD.

redaktor - redactor:

Ing. Elena Kantoríková, PhD.

vedecký redaktor - scientific editor:

prof. Ing. Jozef PILC, CSc.

redakčná rada - editorial board:

prof. Ing. Ivo SCHINDLER, CSc. (CZ)
doc. Ing. Silvia MALÁKOVÁ, PhD. (SK)
doc. Ing. Petr KAWULOK, PhD. (CZ)
Ing. Vladimíra BIŇASOVÁ, PhD. (SK)
doc. Ing. Jozef BÍLIK, PhD. (SK)
doc. Dr. - Inž. Janusz MUSIAL (PL)
Dipl. Ing. Eva REGER (D)
doc. Ing. Ludmila DULEBOVÁ, PhD. (SK)
prof. Ing. Georgi KODZHASPIROV, DrSc. (RU)
doc. Ing. Ján DIŽO, PhD. (SK)
doc. Mgr. Branislav FTOREK, PhD. (SK)

doc. Ing. Ján MORAVEC, PhD. (SK)
prof. Ing. Jozef PILC, CSc. (SK)
Dr.h.c. prof. Ing. Karol VASILKO, DrSc. (SK)
prof. Ing. Eva TILLOVÁ, PhD. (SK)
prof. Ing. Peter DEMEČ, CSc. (SK)
prof. Ing. Jan SUCHÁNEK, CSc. (CZ)
prof. Dr. Ing. Milan SÁGA (SK)
prof. Ing. Oleksandr KRAVCHENKO, Dr.Tech.Sc. (UA)
prof. Dr. Ing. Miroslav NESLUŠAN (SK)
prof. Ing. Danka BOLIBRUCHOVÁ, PhD. (SK)
prof. Ing. Emil EVIN, CSc. (SK)
prof. Ing. Alžbeta SAPIETOVÁ, PhD. (SK)

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ZOZNAM RECENZENTOV | 4 |
| IDENTIFIKÁCIA PROBLÉMOV S NEROVNOMERNÝM ROZLOŽENÍM TEPLÔT V RÁMCI BATÉRIOVÉHO RACKU PROSTREDNÍCTVOM CFD PRÍSTUPU <i>Zoltán Csuka, Peter Hlbočan</i> | 5 |
| NÁVRH EXPERIMENTÁLNEHO PRACOVISKA PRE TESTOVANIE A VÝSKUM ČINNOSTI BATÉRIOVÉHO ÚLOŽISKA <i>Zuzana Kolková, Jozef Matušov, Augustín Zubo, Aleš Stupka, Jan Jandík</i> | 10 |
| ANALÝZA VPLYVU KONŠTRUKČNÉHO RIEŠENIA BATÉRIOVÉHO PACKU NA CHLADENIE BATÉRIÍ POČAS PREVÁDZKY <i>Peter Hlbočan, Zoltán Csuka</i> | 15 |
| DETERMINATION OF THE DYNAMIC LOAD OF AN IMPROVED HATCH COVER OF AN OPEN WAGON DURING OPERATING MODES <i>Alyona Lovska, Juraj Gerlici, Ján Dižo, Miroslav Blatnický, Vadym Ishchuk</i> | 20 |
| ŠTÚDIA SPOLUPRÁCE ENERGETICKÉHO ÚLOŽISKA Z BATÉRIÍ DRUHEJ ŽIVOTNOSTI A FOTOVOLTAICKEJ ELEKTRÁRNE <i>Martin Liška, Juraj Štrkolec, Jozef Matušov, Tomáš Havlíček, Stanislav Louvar</i> | 26 |
| BATÉRIE DRUHEJ ŽIVOTNOSTI A SYSTÉM SPRÁVY BATÉRIÍ <i>Martin Šuňal, Jaroslav Kopčan, Denis Benka, Tomáš Kulhánek, Jan Jandík</i> | 32 |
| ŠTÚDIA VPLYVU MEDZIADAPTÉRA NA DYNAMICKÉ ZAŤAŽENIE NOSNEJ KONŠTRUKCIE PLOŠINOVÉHO VOZŇA <i>Alyona Lovska, Juraj Gerlici, Ján Dižo, Vadym Ishchuk</i> | 38 |
| MENIČ PRE BATÉRIOVÉ ÚLOŽISKO VYUŽÍVAJÚCE DRUHÝ ŽIVOT BATÉRIÍ <i>Stanislav Turza, Martin Liška, Ondrej Lipták, Pavel Valenta, Jan Zich</i> | 44 |
| TEPELNÝ MODEL ENERGETICKÉHO ÚLOŽISKA S BATÉRIAMI DRUHEJ ŽIVOTNOSTI <i>Richard Žilka, Ondrej Krško, Martin Liška, Stanislav Louvar, Jakub Novotný</i> | 50 |
| ODVODENIE MATEMATICKEHO MODELU HNACIEHO MECHANIZMU PRE POHON PRÍDAVNÝCH ZARIADENÍ DOPRAVNÉHO PROSTRIEDKU <i>Ján Dižo, Vadym Ishchuk, Alyona Lovska, Miroslav Blatnický, Denis Molnár</i> | 56 |

ZOZNAM RECENZENTOV PRÍSPEVKOV

doc. Ing. **Dalibor BARTA**, PhD.
Ing. **Miloš BREZÁNI**, PhD.
doc. Ing. **Miroslav BLATNICKÝ**, PhD.
doc. Ing. **Ján DIŽO**, PhD.
doc. Ing. **Peter DRGOŇA**, PhD.
prof. Ing. **Alyona LOVSKA**, Dr.Sc. Tech.
Ing. **Marta MURGAŠOVÁ**, PhD.
doc. Ing. **Ladislav SCHWARTZ**, CSc.
prof. Ing. **Peter ZVOLENSKÝ**, CSc.

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, 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, 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 nedokonale 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 navrhnuť 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 médiumom a s nehomogénnym rozložením teplotného poľa medzi jednotlivými batériovými modulmi. Na základe výsledkov z *CFD* numerických výpočtov je možné navrhnuť 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.

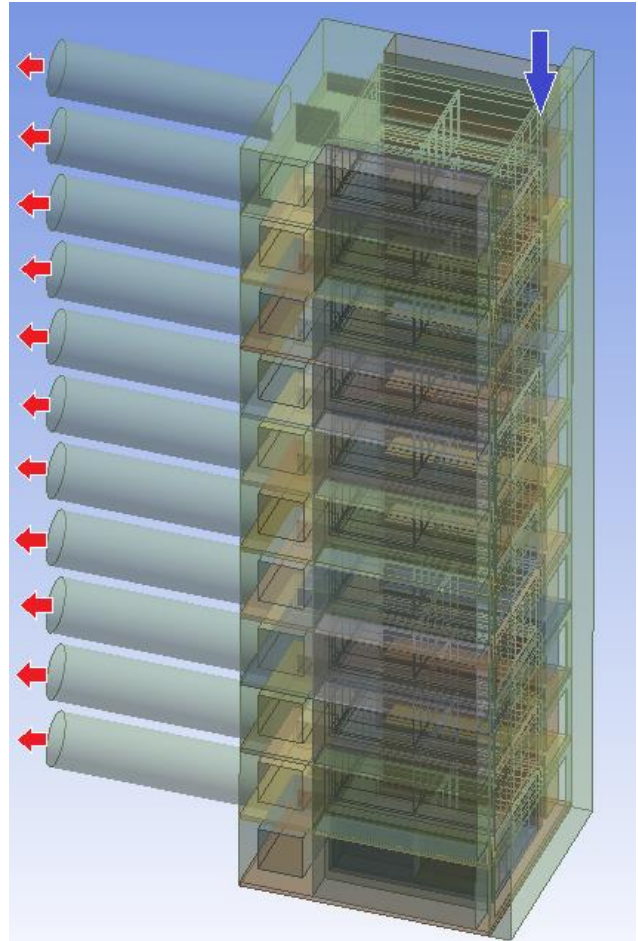
Aplikované boli rôzne idealizácie, či už idealizácia geometrie batériových packov a tiež aj rackov. Geometria bola idealizovaná na základe zachovania najpodstatnejších komponentov racku, boli tiež aplikované rôzne tvarové zjednodušenia pre optimálne generovanie numerickej siete.

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

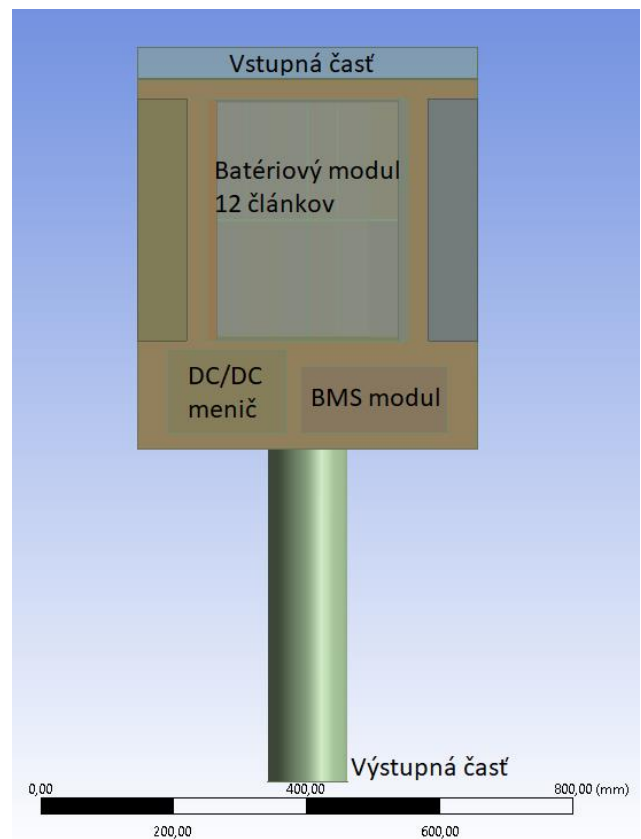
Nižšie uvedený obrázok znázorňuje zjednodušený 3D model racku s 11 batériovými packmi so vstupom chladiaceho média na vrchu. Pre realizáciu simulácie bolo potrebné vytvoriť „negatív“ objemu vyplneného vzduchom, teda z plného objemu „odčítať“ 3D model racku. Táto operácia bola realizovaná v prostredí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



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 ⁻³ |
| Li-ion modul | 50 W | 2 892 W·m ⁻³ |
| DC/DC menič | 150 W | 68 182 W·m ⁻³ |
| BMS modul | 30 W | 26 667 W·m ⁻³ |
| 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.

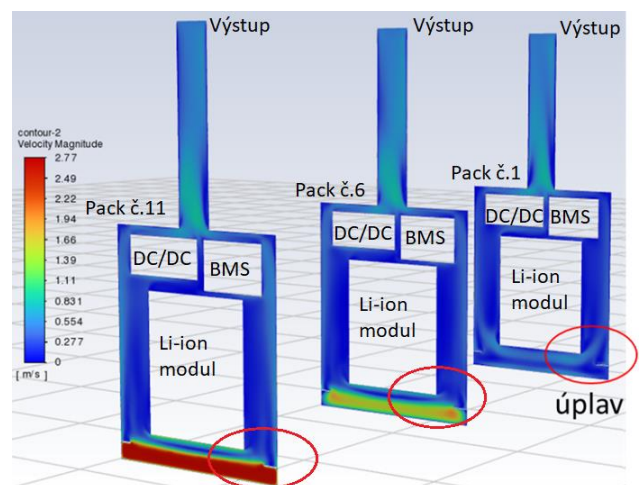
1.1 Numerická sieť

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.

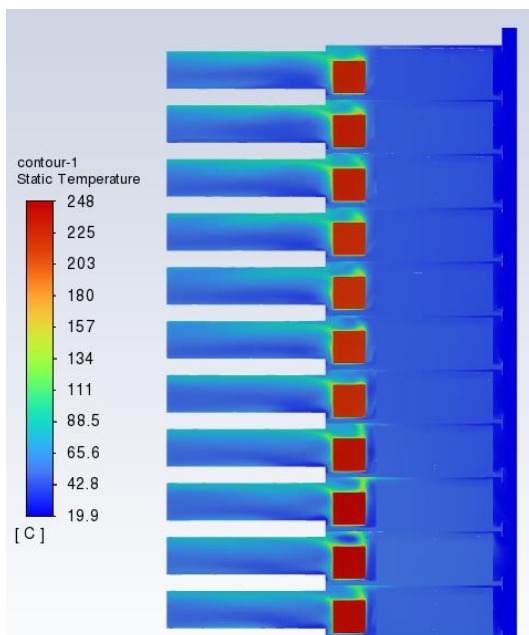


Obr. 3. Rozloženie rýchlosti v rezových rovinách XZ pozdĺž vertikálnej osi (pohľad na batériový rack zhora)

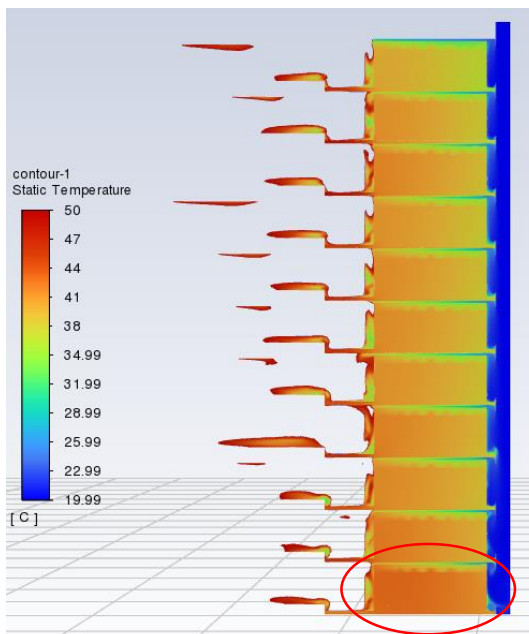
Vzduch vstupujúci do batériového packu obteká batériový modul pričom vzniká výrazný „úplav“, teda predovšetkým bočné steny ale aj zadná stena modulu sú chladené s výrazne nižšou efektívnosťou, keďže vzduch s vyššou rýchlosťou prúdi „ďalej“ od stien batériového modulu.

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)



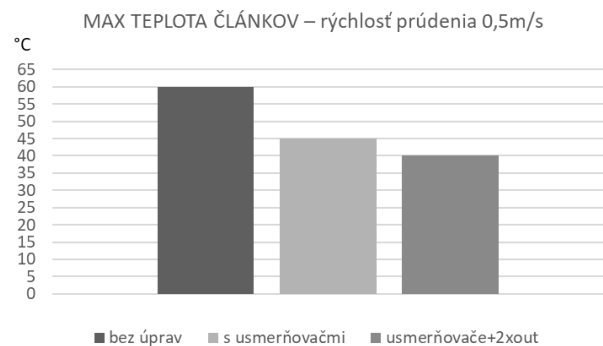
Obr. 5. Rozloženie statickej teploty v rezovej rovine XY v osi batériového racku (pohľad na batériový rack z boku), pri rozmedziach teplôt od 0°C do 50°C .

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

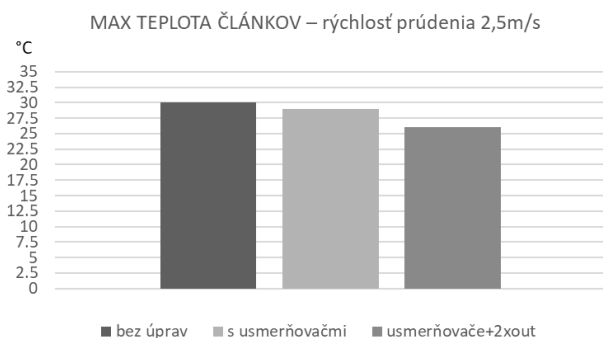
3 POROVNANIE VÝSLEDKOV PO APLIKOVANÍ OPTIMALIZÁCIÍ

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°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°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°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 efektivitu 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>.

Návrh experimentálneho pracoviska pre testovanie a výskum činnosti batériového úložiska

Zuzana Kolková, Ing., PhD.*

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: zuzana.kolkova@energoaqua.sk

Jozef Matušov, Ing., PhD.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: jozef.matusov@energoaqua.sk

Augustín Zubo, Ing.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: augustin.zubo@energoaqua.sk

Aleš Stupka, Ing.

Energycloud, a.s.,
Studentská 1837/50, Bolevec, 323 00 Plzeň, Česká republika.
E-mail: stupka@energycloud.cz

Jan Jandík, Ing.

Energycloud, a.s.,
Studentská 1837/50, Bolevec, 323 00 Plzeň, Česká republika.
E-mail: jandik@energycloud.cz

Design of an experimental workplace for testing and researching the behaviour of battery storage

Abstract: The comprehensive experimental facility for battery storage introduces an innovative approach to analysing and optimizing the performance of energy storage systems. Designed with consideration for energy flow and overall capacity, it utilizes testing of key components such as batteries with a battery management system and power inverters. The facility, housed in two standard 20ft freight containers, not only enables efficient testing but also offers advantages in terms of cost-effectiveness, customization, mobility, and the possibility of parallel tests. The containers also serve as laboratory cells, providing an isolated environment for precise experiments. The division of the container into three main sections - power, control, and testing - brings a systematic approach to experiments with a focus on safety features. Implemented fire barriers and resilient windows ensure a secure environment for the development and testing of battery storage, contributing to the advancement of modern energy technologies.

Keywords: battery storage, power workplace, electrotechnical laboratory, experimental workplace.

ÚVOD

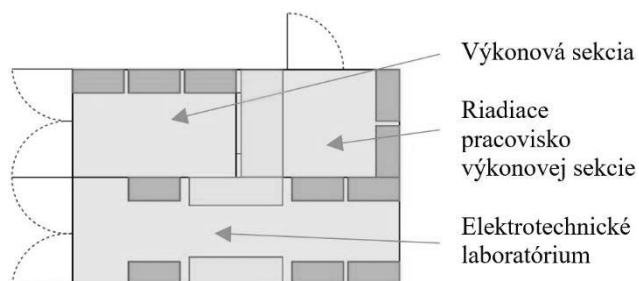
Komplexné experimentálne pracovisko na testovanie a výskum správania batériového úložiska prináša inovatívny prístup k analýze a optimalizácii výkonu akumulátorových zostáv. Navrhnuté je s ohľadom na veľkosť prietoku energie a celkovú kapacitu, využíva testovanie kľúčových častí batériových úložísk, najmä batérií s battery management systémom a

výkonových meničov. Zariadenie zaisťuje tiež reguláciu a konverziu elektrickej energie.

S ohľadom na komplexitu batériových úložísk a ich zariadení je experimentálne zariadenie umiestnené v dvoch 20ft dlhých štandardizovaných kontajneroch. Táto konfigurácia nielenže umožňuje efektívne testovanie, ale taktiež poskytuje výhody v podobe cenovej dostupnosti, individuálneho prevedenia, mobility a možnosti paralelizácie testov. Kontajnery

zároveň plnia funkciu laboratórných buniek a zaisťujú izolované prostredie pre precízne experimenty.

Rozdelenie kontajnera na tri hlavné časti - výkonovú sekciu, riadiace pracoviská a testovaciu sekciu - prináša systematický prístup k experimentom a umožňuje účinnú správu a monitorovanie testovaných systémov. Pre bezpečnosť a ochranu proti požiaru boli implementované protipožiarne priečky, navrhnuté v súlade s normami. Tieto priečky zo špeciálnych protipožiarnych materiálov odolávajú vysokým teplotám a požiaru. Dôraz na bezpečnosť sa odráža aj vo zvolených protipožiarnych oknách z odolných materiálov, ako je sklo keramického typu alebo sklo s bezpečnostnou fóliou, tieto okná zaisťujú, že aj pri vysokých teplotách a požiaru udrží svoju integritu. Experimentálne pracovisko prináša inovatívne a bezpečné prostredie pre vývoj a testovanie batériových úložísk, prispievajúce k rozvoju moderných energetických technológií.



Obr. 1. Rozloženie experimentálneho pracoviska v dvoch 20 ft lodných kontajneroch

1 USPORIADANIE PRACOVISKA

Najprv sa zameriame na vnútornú konštrukciu pracoviska, súčasťou ktorého je dvojité podlahy. Pod podlahou je dutý priestor na ukladanie káblov. Pochôdzna podlaha je tvorená ESD modulárnym systémom v súlade s normami, aby sa minimalizovalo riziko poškodenia elektroniky elektrostatickým nábojom. Tento elektricky vodivý systém efektívne odvádza elektrostatický náboj od citlivých elektronických súčiastok.

Riešenie prestupov kabeľážou v komplexnom experimentálnom pracovisku je riešené protipožiarne prestupmi umožňujúcimi priechod inštaláciou cez protipožiarne konštrukcie, ako sú steny či stropy, a je nevyhnutné zaistiť ich kvalitné prevedenie v súlade s normami.

V navrhnutom riešení sa využívajú certifikované protipožiarne manžety, krížové steny, jednostranné alebo obojstranné protipožiarne dvere a steny. Tieto zariadenia musia spĺňať požiadavky na šírku, výšku, nosnosť a materiál. Umiestnenie protipožiarnych prestupov je zahrnuté v druhej vrstve podlahového systému.

Káblkové trasy tvorené kovovými a plastovými profilmi sú strategicky umiestnené na stenách, strope a podlahe. Tieto trasy slúžia na bezpečné vedenie

elektrickej energie, dátových káblov a ďalších druhov vedenia. Ako ideálne riešenie káblových žľabov bolo zvolené riešenie s využitím drôtových žľabov *MERKUR 2*, zahŕňajúce tieniacu prepážku na oddelenie silových vodičov od dátových liniek.

2 ELEKTROTECHNICKÉ LABORATÓRIUM

Elektrotechnické laboratórium je vybavené špeciálnym zariadením pre výskum, testovanie a vývoj v oblasti elektrotechniky. Toto laboratórium je ďalšou časťou komplexnej experimentálnej elektrotechnickej zostavy. Navrhnutá je pre nižšie výkony, ale zahŕňa širokú škálu prístrojov na testovanie rôznych zariadení. Priestor laboratória je štruktúrovaný do čiastkových blokov, kde sú umiestnené zariadenia pre efektívnu prácu s testovanými elektrickými zariadeniami.

Testovacie pracovisko obsahuje laboratórne stoly na testovanie zariadení, vrátane meničov AC/DC, DC/DC, hybridných meničov a batérií. Je tiež vybavená ESD povrchmi na ochranu elektrotechnických zariadení pred elektrostatickými výbojmi. Každé pracovisko obsahuje napájaciu a meraciu techniku prepojenú podlahou alebo priamo k pracovisku. Rozvádzačový systém zaisťuje trojfázovú sieť s galvanickou izoláciou.

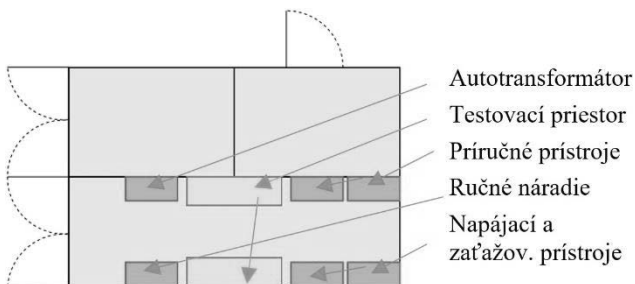
Testovací priestor pre experimentálne meranie nižších výkonov je navrhnutý podľa normy ISO ČSN EN ISO/IEC 17025 [1], s využitím laboratórneho stola od spoločnosti "Alfa". Vybraný laboratórny stôl ponúka všestranné využitie s možnosťou prispôsobenia police a osvetlenie podľa potrieb technika. Táto variabilita umožňuje umiestnenie rôznych prístrojov na analýzu meraných veličín a telekomunikačných zariadení pre okamžité hodnotenie meraných celkov. Integrácia užívateľsky prístupných zásuviek s elektrickým napätím poskytuje možnosť napájania rôznych prístrojov podľa potreby.

V rámci napájacej a zaťažovacej časti elektrotechnického laboratória je k dispozícii široká škála zariadení, od príručných napájacích zdrojov po sofistikované elektrotechnické zaťažovacie systémy. Na všeobecné použitie bol doporučený laboratórny napájací zdroj *Rohde & Schwarz NGE102B* s nízkym zvlnením výstupného napätia. Pre napájanie komplexných systémov bol vybraný výkonný zdroj *GW Instek APS-7000E* s rozsahom napätia a frekvencií. Na zaťažovanie zariadenia odporúčame inteligentnú elektronickú záťaž *AIM-TTI LD400* s možnosťou nastavenia piatich rôznych charakteristík zaťažovania. Tieto zariadenia boli vybrané s ohľadom na presné a bezproblémové napájanie a testovanie elektrických zariadení v laboratórnom prostredí.

V príručnom prístrojovom vybavení elektrotechnického laboratória dominujú zariadenia

zaisťujúce prenosné a praktické meranie elektrických veličín. Medzi prístroje patrí multifunkčný elektrotechnický merací prístroj *OWON XDM2041* na analýzu elektrického napätia, prúdu, indukčnosti a rezistivity s vysokou presnosťou. Na detailnú analýzu časových odoziev elektrických signálov sa odporúča osciloskop *RTB4004* so šírkou meracieho pásma 300 MHz a časovou základňou 1 ns - 1000 s·div⁻¹. Na prenosné meranie na rôznych miestach laboratória je vhodný prenosný multimeter *Fluke 179*, ktorý sa vyznačuje vysokou presnosťou pri meraní jednosmerného napätia. Tieto prístroje boli vybrané na základe rešerše a kľúčových parametrov, ako je presnosť merania, odolnosť zariadenia a schopnosť vykonávať detailné analýzy signálov v reálnom čase. Celkovo tvorí komplexný súbor príručných prístrojov na efektívne a presné meranie v experimentálnych pracoviskách.

V laboratóriu nechýba ani autotransformátor s galvanickou izoláciou elektrickej sústavy. Autotransformátor je kompaktnější a ekonomickejší ako konvenčné varianty. Hlavná výhoda spočíva v regulácii výstupného napätia, ktoré je možné nastaviť od 0V do 260V, čo ho robí ideálnym pre rôzne aplikácie, vrátane vysokonapäťových prenosových vedení a zosilňovačov. Vybraným autotransformátorom pre laboratórium je model *HSN0303* od spoločnosti *METREL* s prenesením výkonu až 3,38 kVA. Galvanické oddelenie elektrickej siete zaisťuje bezpečnosť prenosu signálu medzi obvody. Zvoleným galvanickým oddeľovacím transformátorom je model *PFM3201* od *BREVE TUFVASSONS* s izoláciou 4 kV/60s, poskytujúci pevnú izoláciu medzi primárnym a sekundárnym vinutím.



Obr. 2. Rozloženie elektrotechnického laboratória

3 VÝKONOVÉ PRACOVISKO

V dispozičnom rozvrhnutí výkonovej sekcie experimentálneho pracoviska je kladený dôraz na testovanie meničov až do výkonu 100 kW a batériových systémov do kapacity 100 kWh. Sekcia je prístupná iba vonkajšími dverami a oddelená od zvyšku systému. Medzi bezpečnostné prvky pre zvýšenie bezpečnosti patria *STOP* tlačidlá, snímače prítomnosti a detekcia otvorenia dverí. Klimatizačná jednotka slúži na reguláciu a odvádzanie stratového tepla generovaného pri testovaní meničov. Výkonová

sekcia obsahuje napájacie zdroje a záťaž. Prepojenie s riadiacou sekciami je realizované nehorľavými káblovými žľabmi. Pripojovací bod, AC a DC rozvádzače sú strategicky umiestnené s ohľadom na elektrické vedenie.

Dispozičné rozvrhnutie riadiaceho pracoviska pre výkonovú sekciu je koncipované pre dohľad a vzdialený prístup k prácam vo výkonovom laboratóriu. Kľúčovým prvkom je sklenený priehľad umožňujúci nepretržitý dohľad na meranie a testy. Vzdialený prístup umožňuje reálny časový monitoring a úpravy parametrov napájacích zdrojov. Riadiace pracovisko obsahuje meraciu techniku s prepojením priamo do výkonovej sekcie na vykonanie časových analýz. Centrálny rozvod káblových systémov uľahčuje vzdialený prístup k dátam. Podporné systémy, ako klimatizačné zariadenie a dátové centrum, sú integrované pre efektívne riadenie a monitorovanie experimentálneho pracoviska.

Celú výkonovú sekciu je možné rozdeliť podľa toku energie na napájaciu, ktorá obsahuje zostavy rackových rozvádzačov, elektrické zariadenia a batériu. Táto časť slúži na napájanie testovaných zariadení. Druhá pomyselná časť môže byť nazvaná ako záťažná a funguje na testovanie výkonových systémov. Ďalej je tu umiestnený napájací rozvádzač, kde je hlavný prívod celého systému.

Elektrotechnické laboratórium predstavuje priestor s potenciálnymi elektrotechnickými rizikami. Zavedenie bezpečnostných opatrení je kľúčové pre minimalizáciu úrazov a poškodenie zariadenia. Pravidelná údržba elektroinštalácií, kontrola káblov a zásuvek, uzemnenie a ochrana poistkami sú základnými prvkami bezpečnosti.

Na zaistenie bezpečného experimentálneho testovania elektrotechnických zariadení, najmä výkonových meničov a akumulátorových zostáv, je kľúčové implementovať systém autonómneho odpojenia.

Tento systém s integrovanými akumulátormi umožňuje bezpečné odpojenie zariadenia od napájacieho zdroja a udržiava značné množstvo elektrickej energie. V rámci celého experimentálneho pracoviska sú použité separátne celky pre bezpečné odpojenie zdrojových a výstupných svoriek jednotlivých zariadení. V elektrotechnickom laboratóriu, určené na testovanie menších meničov a akumulátorov s nižšou celkovou kapacitou, je havarijné odpojenie štruktúrované do dvoch stupňov.

Výkonovú sekciu je možné rozdeliť na napájaciu a záťažnú časť. Napájacía časť obsahuje rackové rozvádzače, elektrické sústroje a batériu pre napájanie testovaných zariadení. Záťažná časť slúži na testovanie výkonových systémov a obsahuje napájací rozvádzač s hlavným prívodom systému. Navrhovaný systém pre napájanie a testovanie výkonových

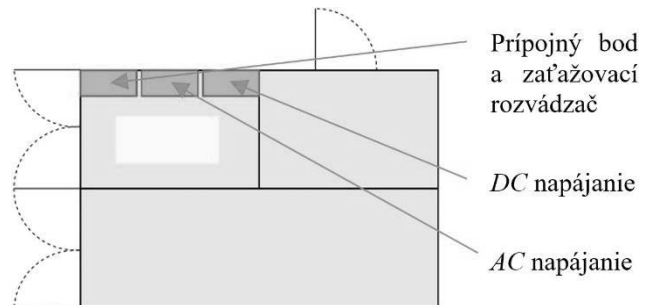
systémov využíva štandardizované rackové riešenia umiestnené v kontajneroch.

Na zaistenie hlavného napájania je použitý výkonový rozvádzač umiestnený vedľa pripojovacieho bodu. Na testovanie výkonových meničov a batériových úložísk sú nutné napájacie zdroje AC a DC. Rozvádzače sú koncipované ako laboratórne zariadenia s bezpečnostnými stýkačkami pripojenými k autonómnemu odpojovaciemu systému v prípade poruchy. Centrálnym bodom systému je istiaci prvok *DEON* od *ABB* s menovitým prúdom 150 A na každú prírodnú fázu. Havarijný stýkač od *ABB* s výkonom 160 kW slúži na bezpečné odpojenie pracoviska. Bezpečnosť obsluhy zaisťuje systém dozoru reziduálnych prúdov s monitorom *R4D415* od *LOVATO*, spĺňajúci požiadavky normy *IEC 61010*.

Koncepcia DC výkonového racku sa zameriava na rezervovaný príkon testovaných meničov a batérií (100 kW) s dôrazom na modularitu. Kritériá pre výber DC výkonového zdroja zahŕňajú rackové riešenie, diaľkové ovládanie, obojsmerný režim, nízke zvlnenie výstupného napätia (100 mV) a paralelizáciu. Obojsmerný režim umožňuje zdroju fungovať ako zdroj, nabíjať batériu alebo ako aktívnu elektronickú záťaž pre simuláciu rôznych typov záťaže. Táto elektronická záťaž má využitie pri testovaní výkonu elektronických komponentov, s možnosťou rekuperácie energie späť do napájacej siete, čo môže viesť k úspore energie a zníženiu nákladov na prevádzku. *Active Front End (AFE)* umožňuje rekuperáciu energie, čo prispieva na efektívne využitie elektrickej energie.

Na testovanie batériových úložísk boli vybrané dva DC napájacie zdroje: *SM 1500-CP-30* od *Delta Elektronik* a *RP7982A* od *Keysight*. Oba umožňujú vrátenie spotrebovanej energie späť do siete, znižujú náklady na chladenie a sú dvojkvadrantové. Sú k dispozícii zdroje *Keysight RP7982A* pre vyššiu výkonovú hustotu a funkciu "*PathWave BenchVue Advanced Battery Test and Emulation*". Táto funkcia podporuje testovanie, generovanie modelov a emuláciu batérií s kapacitou až 600 kWh. Ďalej ponúka funkciu "*Solar Array Simulator Control*" na testovanie fotovoltaiických meničov vrátane simulácie výstupných charakteristík solárnych panelov za rôznych podmienok, pre batériové úložiská so solárnymi meničmi. Odporúčaná zostava a zapojenie DC rozvádzača zahŕňa 5 zdrojov v racku s výškou 5U (každý). Výstupné svorky každého zdroja sú pripojené ku 3 výstupným terminálom, umožňujúcim testovanie 3 zariadenia súčasne. Systém podporuje paralelné spojenie všetkých zdrojov, umožňujúce dodávať alebo zaťažovať výkonom až 150 kW. Variabilita systému umožňuje napríklad použiť dva zdroje na napájanie testovacieho meniča na termináli A a zvyšné dva simulujú batériu alebo záťaž na termináli B. Technológia rekuperácie umožňuje

zdrojom hradí iba straty testovaného meniča a svoje vlastné, čo je kľúčová výhoda tejto zostavy.



Obr. 3. Rozloženie výkonového laboratória

4 RIADIACE PRACOVISKO

Pre efektívne testovanie DC/AC meničov sú kľúčovým prvkom rackové systémy, ktoré spĺňajú vysoké nároky na výkony, prúdy a bezpečnosť. Tieto systémy umožňujú jednoduché pripojenie meničov, vybavené sú bezpečnostnými prvkami a senzormi na monitorovanie dôležitých parametrov. Prítomnosť riadiacich prvkov umožňuje používateľom flexibilne nastavovať a riadiť parametre meničov. Systémy pre laboratórne testovanie DC/AC meničov v priemyselných aj domácich aplikáciách, poskytujú nástroje pre rýchlu diagnostiku a úpravy zariadení. Pre experimentálne testovacie pracovisko bol vybraný *IT7900 Regenerative Grid Simulator*, ktorý umožňuje simuláciu rôznych podmienok distribučnej siete a spätné napájanie s vysokou účinnosťou. Zariadenie je vybavené ochrannými funkciami pre bezpečnú prevádzku.

V modernom priemysle a energetike získava čoraz väčší význam vzdialená správa zaisťujúca bezpečnosť a efektívnosť testovania batériových zostáv a výkonových meničov. Vzdialené riadenie a monitorovanie minimalizujú riziká nehôd a umožňujú efektívnejšie vykonávanie testov. Pre bezpečnosť výkonovej sekcie sa využívajú opatrenia, ako sú bezpečnostné prieskory a kamerový systém, umožňujúci sledovanie testu z bezpečnej vzdialenosti. Výkonová sekcia, kde sa manipuluje s batériovými zostavami, vyžaduje odborné vzdelanie a skúsenosti v oblasti energetiky a priemyselných procesov. Riadiace pracovisko, rešpektujúce normy ako *ČSN EN 33 2000-1 ED.2*, *ČSN 33 2000-5-52*, a *ČSN EN 5191 ED.2*, zaisťuje bezpečné a spoľahlivé vykonávanie testov. Vzdialená správa umožňuje sledovanie v reálnom čase, vzdialené úpravy a rýchle vyhodnotenie výsledkov, prispievajúce k rýchlejšiemu a efektívnejšiemu riešeniu prípadných problémov.

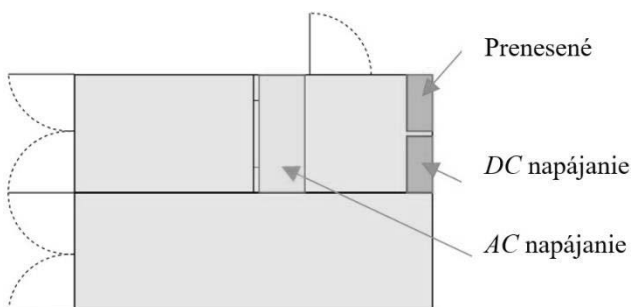
Vzdialený prístup do výkonovej sekcie je prvkom moderných experimentálnych pracovísk, umožňujúcim diaľkovú obsluhu a zvyšovanie efektivity práce. Výkonová sekcia je navrhnutá pre bezpečnú prevádzku bez prítomnosti obsluhy, a

vzdialené riadiace stanovište so štyrmi 27“ zobrazovacími jednotkami prepojenými s PC poskytuje prehľadné ovládanie. Táto technológia umožňuje diaľkové testovanie zariadení, DC/AC meničov, s možnosťou ovládania výkonových zdrojov a záťaží. Prepojenosť s analytickými prístrojmi a sledovanie dát v reálnom čase minimalizuje chyby, zvyšuje bezpečnosť a efektivitu testovania. Koncept je v súlade s normou ČSN EN 50191 ED.2.

Súčasťou priestoru je aj podporný rozvádzač laboratória zaisťujúci chod experimentálneho pracoviska. Elektrické napájanie, klimatizačné jednotky, dátové centrum, bezpečnostný systém a IT vybavenie sú nevyhnutné pre správne fungovanie. Okrem toho je zásadným prvkom UPS, ktorá zaisťuje neprerušené napájanie v prípade výpadku zo siete. Táto technológia podporuje bezpečnú prevádzku laboratória a udržiava nepretržitú činnosť systémov pre oblasti s kritickými dátami alebo potrebou neustálej prevádzky schopnosti.

Pri testovaní elektrických zariadení nutné zaistiť presné meranie pre vyhodnotenie parametrov a získanie relevantných dát pre analýzy. Merané parametre zahŕňajú napätie, prúd, frekvenciu, účinnosť a tepelné straty. Napätie a prúd sú základné na určenie výstupného výkonu zariadenia. Frekvencia je dôležitá pre správne fungovanie výkonových meničov. Účinnosť ukazuje, ako efektívne zariadenie využíva energiu, zatiaľ čo meranie tepelných strát je kľúčové pre prevenciu prehrievania a optimalizáciu výkonu.

Moderné analyzátory výkonu ponúkajú precízne meranie s funkciami pre komplexné analýzy a sledovanie harmonických zložiek signálu. Mobilné rackové prevedenie meracieho konceptu umožňuje flexibilné presunutie medzi výkonovou a riadiacou sekciou. Nenahraditeľným prvkom je výkonový analyzátor, umožňujúci presné meranie a analýzu výkonu a kvality napájania elektrických zariadení. Meria parametre, vrátane účinnosti, faktora výkonu a harmonického skreslenia v reálnom čase. Ideálnym kandidátom je LM671 od ZES ZIMMER pre vyššiu presnosť, viac vstupných kanálov.



Obr. 4. Rozloženie riadiaceho pracoviska

ZÁVER

Navrhnuté elektrotechnické laboratórium predstavuje komplexné a sofistikované pracovisko pre experimentálne meranie a testovanie elektrických zariadení. Zahŕňa nízkovýkonovú časť, testovací priestor a príručné prístrojové vybavenie, umožňujúce pokrytie širokej škály testovaných zariadení od meničov po akumulátorové zostavy. Okrem toho je laboratórium vybavené modernými analyzátormi výkonu, precíznymi výkonovými analyzátormi a zariadením pre galvanickú izoláciu elektrickej sústavy. Napájacia a zaťažovacia časť laboratória zahŕňa širokú škálu zariadení od príručných napájacích zdrojov až po výkonné zdroje. Navrhnuté laboratórium poskytuje ideálne prostredie na presné meranie a testovanie elektrických zariadení v rôznych aplikáciách a podmienkach.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Úložiská energie z batérií druhej životnosti / Second-life battery storage systems, ITMS2014+: 313012BNG4, 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] ČSN EN ISO/IEC 17025. *Všeobecné požiadavky na kompetenciu zkušebných a kalibračných laboratórií*. Praha: Úrad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 46 str. Třídící znak 015253.
- [2] ČSN 33 2000-1 ED.2. *Elektrické instalace nízkého napětí - část 1: základní hlediska, stanovení základních charakteristik, definice*. Praha: Úrad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 43 str. Třídící znak 332000.
- [3] ČSN 33 2000-5-52 ED.2. *Elektrické instalace nízkého napětí - část 5-52: výběr a stavba elektrických zařízení - elektrická vedení*. Praha: Úrad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 119 str. Třídící znak 332000.
- [4] ČSN EN 50518. *Dohledová a poplachová přijímací centra*. Praha: Úrad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 42 str. Třídící znak 334599.
- [5] ČSN EN 50191 ED.2. *Zřizování a provoz zkušebních elektrických zařízení*. Praha: Úrad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 23 str. Třídící znak 331345.

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

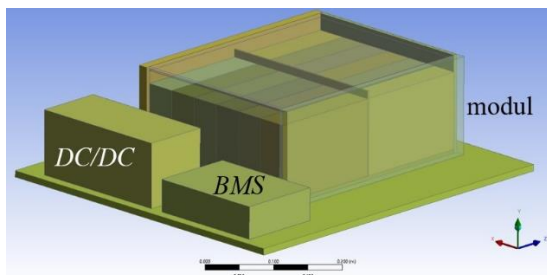
Konštrukčný návrh *Second Life Battery Storage (SLBS)* systému zahŕňa okrem iného návrh koncepcie a rozmerov batériových packov, ktoré sú zoradené do jednotlivých batériových rackov tvoriacich hlavné súčasti batériového úložiska. Pri konštrukčnom návrhu batériových packov (a rackov) je potrebné zohľadniť 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 Systému (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

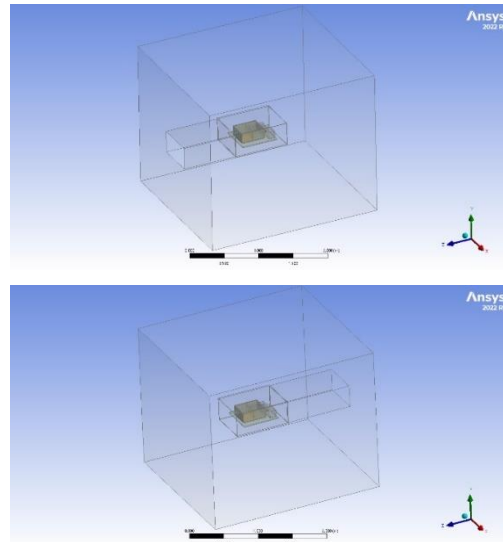
1 SIMULAČNÝ MODEL

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- ω 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.

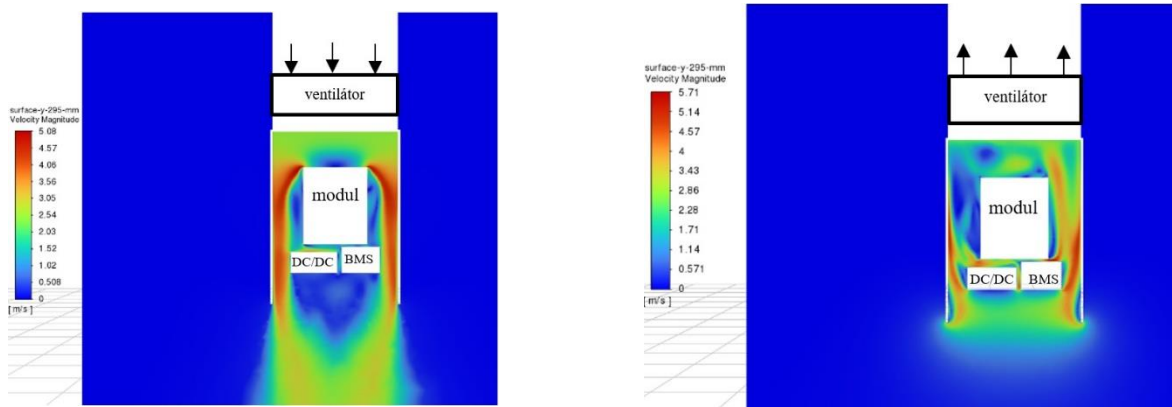
Namiesto riešenia elektrochemických reakcií a ďalších potenciálnych zdrojov tepla bol ako okrajová podmienka definovaný tepelný tok vznikajúci v každom batériovom článku (4 W na článok) a v *BMS* s *DC/DC* meničom. Hodnoty tepelných tokov boli definované ako konštanty nezávislé na okolitej teplote a 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°C . Výstupnou okrajovou podmienkou bola hodnota atmosférického tlaku.

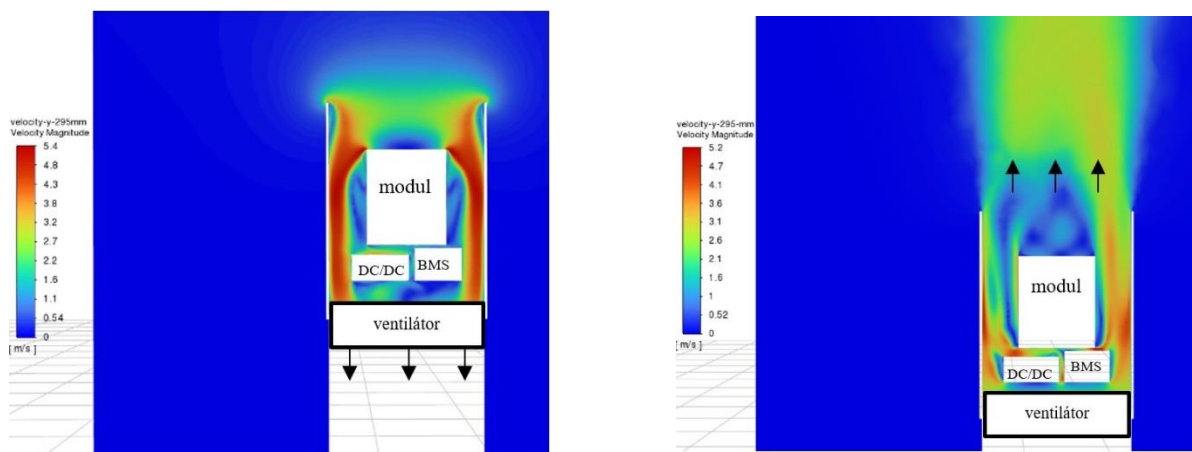
2 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

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 rozdistribúvanie 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

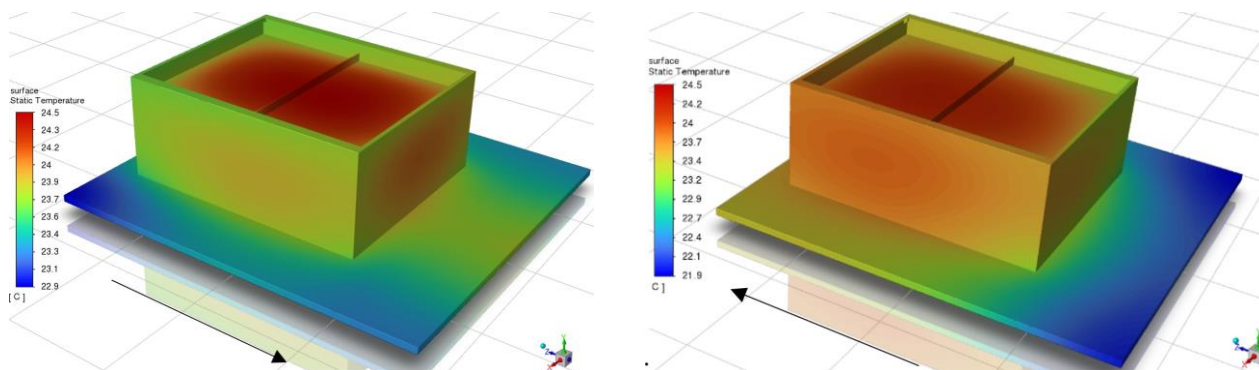
maximálnou dosahovanou teplotou batériového článku a teplotou okolia resp. priemernou teplotou stien modulu. Hodnoty pre všetky štyri analyzované alternatívy batériového packu sú uvedené v tab. 1. Na obr. 5 až obr. 8 sú teploty modulu a dosky. Teploty zvyšných častí packu nie sú predmetom analýzy.

ZÁVER

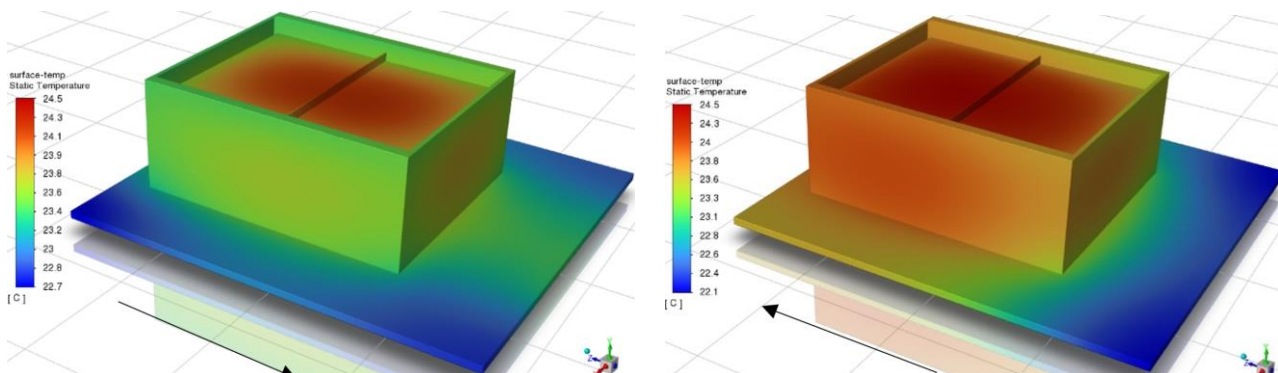
Výsledky CFD simulácie preukázali, že výsledné rozloženie teplotného poľa je ovplyvnené konkrétnym rozdistribúvaním prúdiaceho vzduchu (poľom rýchlosti prúdenia chladiaceho vzduchu), ktoré závisí od smeru prúdenia a od umiestnenia ventilátora.

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

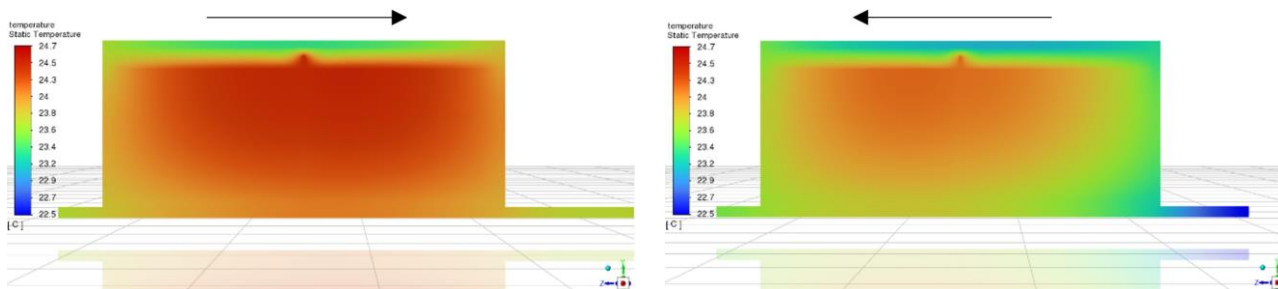
| Spôsob distribúcie vzduchu | Ventilátor tlačí vzduch | Ventilátor nasáva vzduch | Ventilátor nasáva vzduch | Ventilátor tlačí vzduch |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Smer prúdenia (poradie) | modul -> 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 |



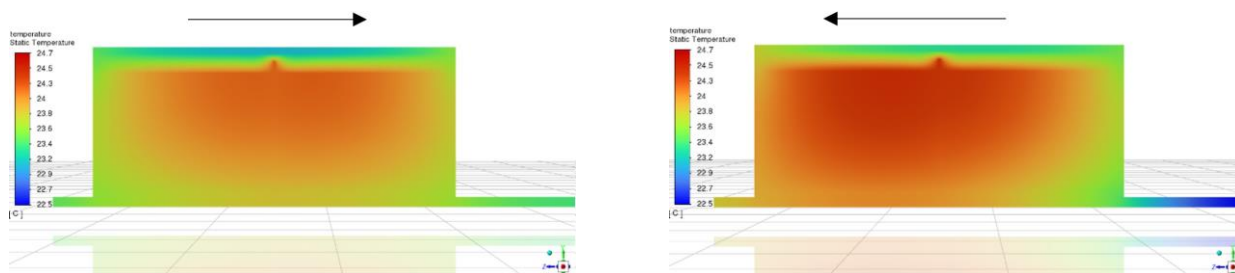
Obr. 5. Teplota (pevných častí modulu a základovej dosky): ventilátor tlačí vzduch smerom na modul (v poradí modul - BMS s DC/DC meničom) - vľavo, ventilátor nasáva vzduch spoza modulu (v poradí BMS s DC/DC meničom - modul) - vpravo. Šípky označujú hlavný smer prúdenia chladiaceho vzduchu



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*, IJSET – 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 LiCoO₂ 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>.

Determination of the dynamic load of an improved hatch cover of an open wagon during operating modes

Alyona Lovska, prof. Ing., Dr.Sc. Tech.*

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: alyona.lovska@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2660

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2550

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2560

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: miroslav.blatnický@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2659

Vadym Ishchuk, Ing.

Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Žilina,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina, Slovak Republic.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2563

Abstract: The article presents the results of determining the dynamic load of the improved cover of an open wagon under operational conditions. The peculiarity of the manhole cover is that the canvas is formed by the upper and lower sheets, between which, there is an energy-absorbing material with viscous properties. The dynamic load of the cover when a load of 150 kg falls on it was studied. It was determined, that the use of energy-absorbing material contributes to the reduction of the cover load by 21 % compared to a typical original design. The main indicators of the dynamics of an open wagon equipped with improved manhole covers are calculated. The results of the calculations showed that the studied dynamic indicators are within the permissible limits. The conducted studies will contribute to the reduction of damage to manhole covers during operation and the cost of maintaining one wagons.

Keywords: transport mechanics, an open wagon, improved design, dynamic load.

INTRODUCTION

Harmonious functioning of the transport industry is one of the main factors in the successful development of the economy of *Eurasian* countries. It is known that railway transport is one of the most promising components of the transport infrastructure. Transportation of bulk and bulk cargoes, which make up a significant share of the total cargo turnover, is

carried out in open wagons. At the same time, hatch covers are one of the most damaged elements of the load-bearing structures of open wagons (Fig. 1). This is due to their significant load in operation, as elements that form the floor of open wagons.

A frequent cause of damage to manhole covers is loading and unloading operations on open wagons in seaports and private enterprises (Fig. 2). At the same

time, as the result of the shock load of the unloading means, damage to hatch covers such as deformations, cracks, fastening violations, etc. may occur.

It is necessary to implement measures aimed at improving their strength indicators during operational modes to ensure the strength of hatch covers of open wagons.

Many scientific publications are devoted to the research of the load of manhole covers in operation.

Thus, for example, the determination of the main strength indicators of the hatch cover of a universal open wagons, when the load falls on it, is carried out in the work [1]. The results of the study determined, that the typical design of the manhole cover does not meet the conditions of strength, as its damage occurs under the applied regime. However, the authors did not propose measures to improve the design of the hatch cover to ensure its durability in operation.

a)



b)



Fig. 1. Damage of hatch covers of open wagons:
a) deformation, b) damage of the cast

The features of the improvement of the cover of the half-car hatch are given in the work [2]. The authors suggested replacing the profile of the sheet, which has a stepped shape in the fastening part, with a more rational profile. The results of calculations on the

strength of the manhole cover are given. At the same time, the proposed improvement does not contribute to reducing the dynamic load of the manhole cover during operational modes.

A description of the features of the resource tests of the welding seams of the hatch cover fastening elements in the open wagon with the purpose of determining their strength is carried out in the work [3]. It was established that the welding seams of the hinge holders and slats-holders of the hatch cover in the open wagon withstood the operational resource accepted for the hatch cover during the time from construction to major repair.

Factors affecting the durability of universal open wagons in operation were studied in [4]. To ensure sufficient strength and avoid the appearance of residual deformations, a new hatch cover design is proposed. A special feature of the manhole cover is the reinforced execution of the strapping, a smooth sheet of cladding and the installation of cast brackets. Also, the structure has additional braces to ensure sufficient strength. In addition, it is possible to modify the hatch cover with brackets from a corner profile.

a)



b)



Fig. 2. Unloading open wagons with grab buckets:
a) in seaport conditions, b) in the conditions of a private enterprise

However, the dynamic load of the manhole cover was not taken into account in the work carried out, as the mode of its greatest load in operation.

The substantiation of the use of polymer composite materials in railcar construction is carried out in [5]. At the same time, the proposed materials are supposed to be used for the flooring of the wagon floor. The results of experimental studies using the method of pressing the composite in the mold are highlighted. Along with this, the authors do not conduct a study of the introduction of advanced materials into the design of hatch covers of open wagons.

The paper [6] highlights the prospects for the use of polymer composite materials in railway vehicles design. The features of the use of such materials in relation to the hatch cover of the open wagon are given. The results of the calculation on the strength of the manhole cover are presented. However, the authors did not determine the dynamic load of the open wagon hatch cover, and when calculating it, the normative values of the loads were taken into account.

The results of the study of the loading of the hatch cover of the open wagon of the improved design are given in the publication [7]. It has been established that the proposed solutions for improving the hatch cover are appropriate. Along with this, the authors did not determine the dynamic load of the hatch cover.

The article [8] considered the features of the concept of modernization of freight wagons, including an open wagon type. The authors proposed measures to adapt the supporting structures of the wagons to the operating conditions of the load. The results of the calculation of the strength of the modernized load-bearing structures of the wagons are presented.

It is important to note that when designing the load-bearing structures of the wagons, measures are not provided to reduce their dynamic load during operation.

The results of determining the load bearing structures of railway vehicles during operational modes are highlighted in the works [9, 10]. At the same time, the authors proposed measures to reduce the load by introducing flexible connections in their construction. This implementation is effective, however the authors did not consider its application in relation to hatch covers of open wagons.

Features of the optimization of load-bearing structures of freight wagons are covered in the article [11]. The goal of the optimization was to reduce the material capacity of the supporting structure of the car by using aluminum panels in the body. The use of the proposed panels also helps to reduce the dynamic load of a wagon due to the presence of

flexible connections in them. However, the authors did not investigate the issue of reducing the dynamic load of open wagon hatch covers.

The analysis of literature sources [1-11] allows us to conclude that the issue of reducing the dynamic load of the components of the load-bearing structures of wagons is quite relevant. However, due attention has not yet been paid to the improvement of hatch covers of open wagons to ensure their strength by reducing the dynamic load.

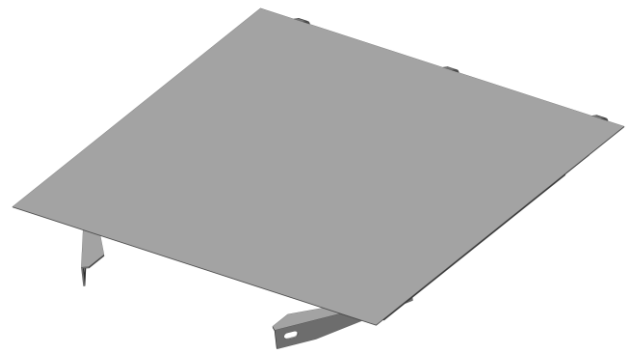
In this regard, the purpose of the article is to highlight the results of determining the dynamic load of the hatch cover of the open wagon of the improved design during operational modes. This will contribute to the reduction of damage to manhole covers during operation and the cost of maintaining open wagons. To achieve this goal, the following tasks are defined:

- determine the dynamic load of the improved design of the open wagon hatch cover,
- determine the dynamic load of an open wagon equipped with improved manhole covers.

2 METHODOLOGY

One of the most damaged components of the manhole cover is its fabric. To ensure the strength of the fabric, it is proposed to improve the hatch cover.

a)



b)

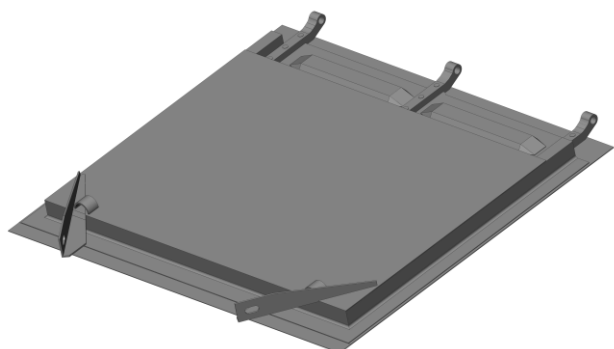


Fig. 3. Manhole cover: a) top view, b) bottom view

At the same time, it is assumed that the canvas is formed by the upper and lower sheets, between

which there is an energy-absorbing material with viscous properties (Fig. 3). The thickness of the canvas is about 3 mm. Aluminum foam was considered as an energy-absorbing material.

At the first initial stage of the research, the dynamic loading of the manhole cover when a load weighing 150 kg falls on it was determined in accordance with [12]. The calculation scheme of the hatch cover is shown in Fig. 4. The calculation was carried out in a flat coordinate system. It is taken into account that the cover of the hatch tightly fits around the perimeter to the components of the supporting structure of the open wagon.

The impact of the hatch cover comes after its center and is absolutely hard.

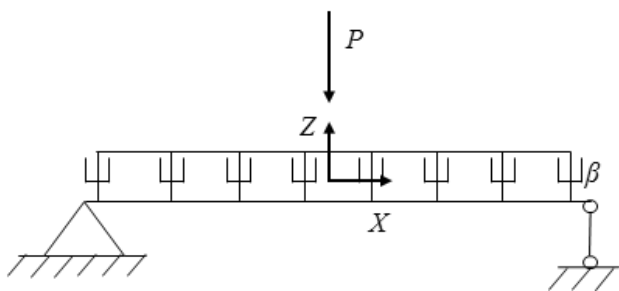


Fig. 4. A calculation diagram of the hatch cover when it is subjected to the shock load

The mathematical model of the dynamic load of the manhole cover looks like this:

$$M_K \cdot \ddot{z} + C \cdot z = P - \beta \cdot \dot{z}, \quad (1)$$

where M_K - hatch cover mass,

C - hatch cover stiffness,

P - impact force acting on the hatch cover,

β - coefficient of viscous resistance of the energy-absorbing material

\ddot{z}, \dot{z}, z - the generalized acceleration, speed and displacement of the hatch cover under the impact load on it, respectively,

It is taken into account that the origin of the coordinate system is located in the center of mass of the hatch cover. The input parameters to the mathematical model are the characteristics of the hatch cover, as well as the impact force.

The mathematical model was solved in the *MathCad* software [13, 14]. At the same time, the *Runge-Kutta method* was used [15, 16]. It is assumed that the initial velocities and displacements are zero.

In connection with the fact that the improvement of the manhole cover helps to reduce its mass by 10.6 % compared to the typical design, the main indicators of the dynamics of an open wagon equipped with improved manhole covers were determined. The open wagon model 12-757 was chosen as the prototype wagon.

It is taken into account that the open wagon moves in an empty state along a rail unevenness that has joints [16]. At the same time, the track has elastic-viscous properties.

The wagon is considered as a system consisting of three elements - a body and two bogies. It is taken into account that each component of the oscillating system has two degrees of freedom relative to the vertical axis, i.e. bouncing and galloping oscillations are considered.

The calculation scheme of the open wagon is shown in Fig. 5. The origin of the coordinate system is located at the center of mass of the open wagon. The input parameters to the mathematical model are the technical characteristics of the open wagon, as well as the rail unevenness.

The system equations of motion (2) of the open wagon in the vertical plane have the following form:

$$\left\{ \begin{aligned} & M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = \\ & = -F_{FR} \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right), \\ & M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + C_{2,5} \cdot q_5 = \\ & = F_{FR} \cdot l \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right), \\ & M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + \\ & + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = F_{FR} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \\ & + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \\ & M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_4 + C_{4,4} \cdot q_4 + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} q_4 = \\ & = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \\ & M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} \cdot q_1 + C_{5,2} \cdot q_2 + C_{5,5} \cdot q_5 + \\ & + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} q_5 = F_{FR} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \\ & + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \\ & M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} \cdot q_6 + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} q_6 = \\ & = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

where M_1, M_2 corresponds to the mass and moment

of inertia of the supporting structure of the open wagon during jumping and galloping oscillations,

M_3, M_4 - mass and moment of inertia of the first cart in the course of its movement,

M_5, M_6 - mass and moment of inertia of the second cart in the course of its movement,

C_{ij} - characteristic of the elasticity of the elements of the oscillating system,

B_{ij} - scattering function,

a - half of the cart base,

q_i - generalized coordinates corresponding to bouncing and galloping oscillations,

k_b - stiffness of spring suspension system,

β_i - damping coefficient,

F_{FR} - frictional force in the spring assembly.

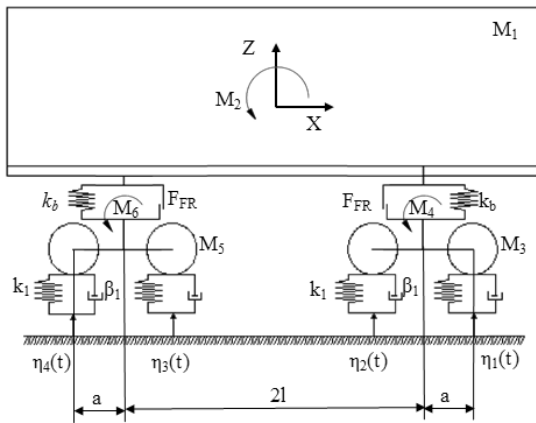


Fig. 5. A calculation scheme of an open wagon

The solution of the system of differential equations (2) was carried out in the *MathCad* software complex using the *Runge-Kutta method* under initial conditions close to zero.

3 RESULTS

Based on the calculations of the dynamic load of the hatch cover when a load weighing 150 kg falls on it, it was established that the acceleration acting on it is of $6.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Fig. 6).

At the same time, it is important to say that the use of energy-absorbing material helps reduce the load on the hatch cover by 21 % compared to a typical design.

The results of the calculations of the main indicators of the dynamics of an open wagon equipped with an improved design of hatch covers are shown in Fig. 7 to Fig. 9.

The maximum accelerations acting in the center of mass of the supporting structure of the one wagon amounted to the value of $4.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. The acceleration of the supporting structure in the zones of support on the trolleys is equal to $6.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. The coefficient of vertical dynamics is equal to 0.63.

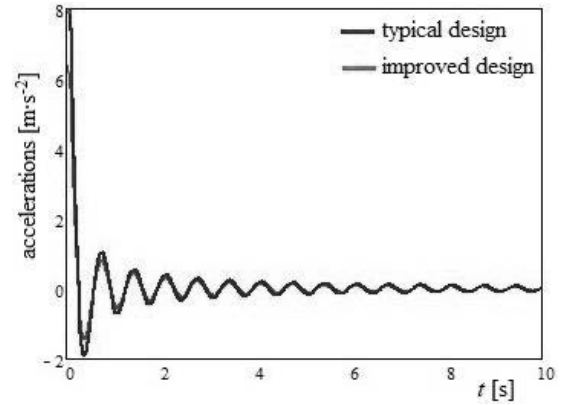


Fig. 6. Accelerations acting on the hatch cover

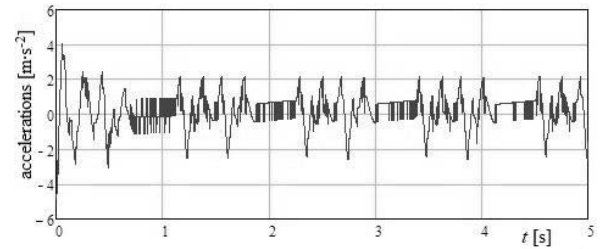


Fig. 7. Accelerations of the supporting structure of the open wagon in the center of mass

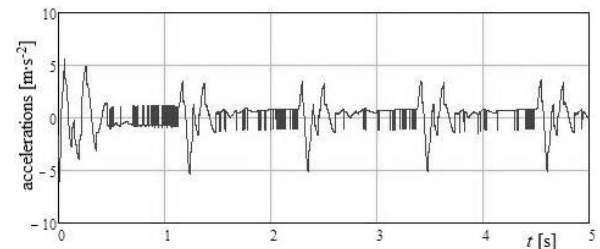


Fig. 8. Accelerations of the bearing structure of the open wagon in the areas of support on the carts

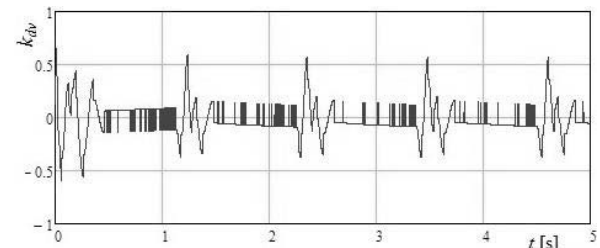


Fig. 9. The coefficient of vertical dynamics of the open wagon

Therefore, the indicators of the dynamics of the open wagon are within the permissible limits and the course of movement in accordance with the regulatory documents is assessed as "excellent" [12]. It should be said that the obtained dynamics indicators slightly exceed those for the prototype wagon, since the structure has a smaller container. At the same time, it becomes possible to increase the carrying capacity of the wagon by the size of the reduced container, which will contribute to the increase in the volume of cargo transportation.

CONCLUSIONS

The dynamic load capacity of the improved design of the open wagon hatch cover was determined. The

case of a load weighing 150 kg falling on it is taken into account. At the same time, the acceleration acting on the improved hatch cover was $6.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Therefore, the use of energy-absorbing material helps reduce the load on the hatch cover by 21 % compared to a typical design.

The dynamic load capacity of an open wagon equipped with improved manhole covers was determined. The maximum accelerations acting in the center of mass of the supporting structure of the open wagon amounted to 4.7 accelerations [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. The coefficient of vertical dynamics is equal to the value of 0.63. Therefore, the dynamics indicators of the open wagon are within the permissible limits, and the course of movement is assessed as "excellent" in accordance with the regulatory documents.

Acknowledgement

Funded by the EU Next Generation EU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V01-00131.

This work has been supported by the project KEGA 031ŽU-4/2023: Development of key competencies of the graduate of the study program Vehicles and Engines.

REFERENCES

[1] PUTYATO, A. V. (2011): *Modeling the stress-strain state of an open wagon hatch cover when pieces of cargo fall*. In: Mechanics. Scientific research and educational and methodological developments (In Russian), 5, pp. 113–122.

[2] MYAMLIN, S. V. - BARANOVSKYI, D. N. - KEBAL, I. Y. (2015): *Hatch cover of a universal open wagon*. In: Bulletin of scientific works of the Bryansk branch of MIIT (In Russian), 7, pp. 45–48.

[3] BORODAI, O. O. - PASKO, V. V. - STRYNZHA, A. M. - KHUDIENKO, V. A. (2017): *Carrying out resource tests of welding seams of hatch cover fastening elements in an open wagon in order to determine their strength*. In: Collection of scientific works of SE "UkrNDIV". Rail rolling stock (In Russian), 14, pp. 20–24.

[4] VIZNYAK, R. I. - CHEPURCHENKO, I. V. - YATSENKO, A. O. (2016): *Peculiarities of determining the operating loads of the open wagon body and ways of improving its design in order to ensure strength and preservation*. In: Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport (In Russian), 159, pp. 91 – 97.

[5] ZAYNITDINOVA, O. I. - RAHIMOV, R. V. - WAAIL, M. L. - RUZMETOV, Y. O. (2020). *Development of new polymer composite materials*

for the flooring of rail carriage. In: International Journal of Engineering and Technology, 9(2), pp. 378–381.

[6] KARAKAYEV, A. K. - ZARIPOV, R. Y. (2016): *Composite materials in freight car construction*. In: Science and technology of Kazakhstan (In Russian), 1-2, pp. 39–47.

[7] FOMIN, O. - GERLICI, J. - LOVSKA, A. - GORBUNOV, M. - KRAVCHENKO, K. - PROKOPENKO, P. - HAUSER, V. (2019): *The improved hatch cover construction for universal open box-type wagon from the strength and durability point of view*. In: Manufacturing Technology, 19, 2, pp. 216–221.

[8] PŁACZEK, M. - WRÓBEL, A. - BUCHACZ, A. (2016): *A concept of technology for freight wagons modernization*. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 161, pp. 1–12.

[9] VATULIA, G. - GERLICI, J. - LOVSKA, A. - KRASNOKUTSKYI, Y. (2023): *Analyza pozdžneho zataženia kontajnera so stenami vyrobenými zo sendvičovych panelov*. In: Technológ, 15, 1, pp. 80–83.

[10] VATULIA, G. - GERLICI, J. - LOVSKA, A. (2023): *Study of the loading of the body of an open wagon with a floor made of sandwich panels*. In: Railway transport of Ukraine (In Ukrainian), 2, pp. 33–41.

[11] LEE, H.-A. - JUNG, S.-B. - JANG, H.-H. - SHIN, D.-H. - LEE, J.-U. - KIM, K.-W. - PARK, G.-J. (2016): *Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels*. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 230, 4, pp. 1283–1296.

[12] DSTU 7598:2014. *Vantage carriages. For the first time to rebuild and design new and modernized cars with a gauge of 1520 mm (non-self-propelled)*. Kiev, 2015. 250 p.

[13] ZADACHIN, V. M. - KONIUSHENKO, I. H. (2014): *Numerical methods: tutorial* (in Ukrainian). Kharkov, 180 p.

[14] HOI, T. P. - MAKHNEI, O. V. (2012): *Differential equations: a study guide* (In Ukrainian). Ivano-Frankivsk, 352 p.

[15] LOVSKAYA, A. (2014): *Assessment of dynamic efforts to bodies of wagons at transportation with railway ferries*. In: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 4, pp. 36-41.

[16] DOMIN, Y. V. - CHERNIAK, G. Y. (2003): *Fundamentals of wagon dynamics: a study guide* (In Ukrainian). Kyiv: KUETT, 269 p.

Štúdia spolupráce energetického úložiska z batérií druhej životnosti a fotovoltajickej elektrárne

Martin Liška, Ing., PhD.*

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: martin.liska@energoaqua.sk

Juraj Štrkolec, Ing.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: juraj.strkolec@energoaqua.sk

Jozef Matušov, Ing., PhD.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: jozef.matusov@energoaqua.sk

Tomáš Havlíček, Ing.

EnergyCloud a.s.,
Studentská 50, Plzeň, Česká republika.
E-mail: havlicek@energycloud.cz

Stanislav Louvar, Ing.

EnergyCloud a.s.,
Studentská 50, Plzeň, Česká republika.
E-mail: louvar@energycloud.cz

A collaborative study of energy storage from second-life batteries and a photovoltaic power plant

Abstract: The aim of the simulation is to optimize the parameters of the battery storage system using battery cells from electric cars in cooperation with a photovoltaic power plant at the point of connection with a reserved input power of up to 100 kW. The analysis is performed in the *Python* programming environment, where all algorithms and calculations are implemented. The source codes of the simulation contain historical data of specific *PV* power plants.

Keywords: *SLBESS*, *FVE*, *Python*, simulation, programming.

ÚVOD

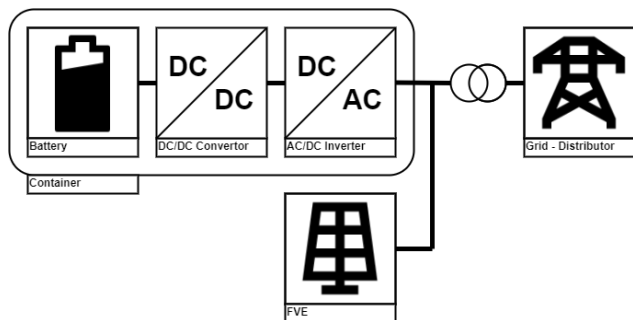
Štúdia skúma reálnu simuláciu batérií druhého života (*SLBESS*) v kombinácii s fotovoltajickou elektrárnou (*FVE*). Táto konfigurácia je pripojená k distribučnej sieti prostredníctvom rezervovanej kapacity (*RK*), ktorá je stanovená schválenou kapacitou distribučného energetického operátora na príslušnom pripojovacom mieste. Cieľom tejto simulácie je maximalizácia využitia výkonu *FVE* pri udržiavaní dodávky do siete pod úrovňou *RK*. Táto situácia sa môže vyskytnúť v prípadoch, keď investor plánuje výstavbu *FVE* na danom mieste, ale distribútor mu

nepridelí dostatočne veľkú *RK* pre pripojenie do siete. V takom prípade je využitý *SLBESS* k akumulácii energie z *FVE*, ktorú nemožno dodať kvôli obmedzeniu hodnotou *RK*. Nahromadená energia z *FVE* je následne dodávaná do siete v dobe, kedy výkon *FVE* nepresahuje *RK*. *SLBESS* využíva túto rezervu k dodávke naakumulovanej energie do siete, pričom to trvá až do dosiahnutia maximálnej hodnoty *RK*, alebo pokiaľ klesne stav nabitia (*SOC*) na minimálnu úroveň. Potom je pripravený k ďalšiemu nabitiu z *FVE* nasledujúceho dňa alebo do doby, pokiaľ výroba elektriny z *FVE* opäť prekročí *RK*, aby mohol *SLBESS* začať znovu nabíjať.

Štúdia obsahuje nastavenie kritériálnych funkcií pre optimalizáciu výpočtov. Uvedené optimalizačné metódy môžu byť uvedené v dvoch prípadoch: buď je RK_{max} stanovený distribútorom a optimalizácia vypočíta najvýhodnejšiu kapacitu úložiska, alebo možno s distribútorom dohodnúť RK_{max} takú, aby následne zistená konfigurácia SOC s RK_{max} poskytla najrýchlejšiu návratnosť, a teda najvýhodnejšie riešenie. Táto štúdia sa zameriava iba na optimalizáciu veľkosti SOC a RK_{max} , ale nerieši optimalizáciu výkonu $SLBESS$. Výkon vždy závisí od rozdielu medzi špičkovým výkonom od RK_{max} , aby batériové úložisko mohlo bez obmedzenia ukladať všetku energiu z FVE nad RK_{max} .

1 SIMULÁCIA

Simulácia je realizovaná v programovacom jazyku *Python*. Jednotlivé simulačné bloky sú definované pomocou výkonových parametrov a charakteristík účinnosti pri toku výkonu oboma smermi.



Obr. 1. Bloková schéma simulačného modelu

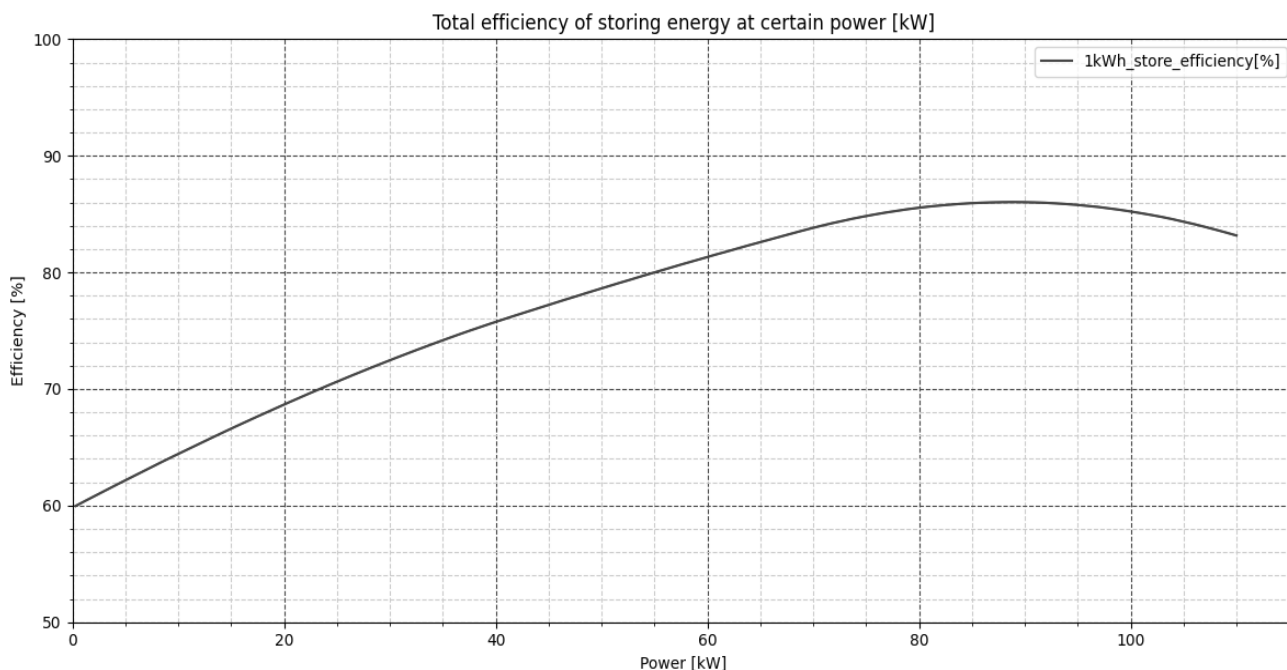
1.1 Nastavenie simulácie

Všetky parametre simulácie (kapacita batérií, maximálny výkon meničov, RK) sa nastavujú parametricky.

1.1.1 Veľkokapacitné úložisko $SLBESS$

Model $SLBESS$ sa skladá z jednotlivých modelov zložených z AC/DC striedačov, DC/DC meničov a batérií. Pro simuláciu boli použité obvyklé charakteristiky účinnosti jednotlivých modulov. Tieto charakteristiky sa definujú niekoľkými bodmi cez celý rozsah ich výkonov. V simulácii sa následne prevedú do hladkých funkcií pomocou metódy interpolácie z bodov daných tabuľkou. Druh interpolácie pre hladké prenosové funkcie je interpolácia pomocou kvadratických a kubických metód. Interpoláciou sa rozumie preloženie bodov $f(x_0)$, $f(x_1)$, ... $f(x_n)$ analytickou krivkou, ktorá umožňuje jednoduchý výpočet funkčných hodnôt vo všetkých medziľahlých bodoch. Kvadratická interpolácia použitá v simulácii je interpolácia funkcie tretieho rádu:

- AC/DC a DC/DC menič - reálne striedače a meniče nemajú konštantnú účinnosť v celom svojom výkonovom rozsahu, a tak sa energia ukladá do úložiska s rôznymi účinnosťami podľa aktuálneho výkonu, pri ktorom sa úložisko prevádzkuje. Vďaka sériovému zapojeniu jednotlivých modulov kontajnera sa účinnosti medzi sebou násobia,
- batérie - účinnosť batérie je nastavená na fixnú hodnotu 98 %.



Obr. 2. Celková účinnosť ukladania energie

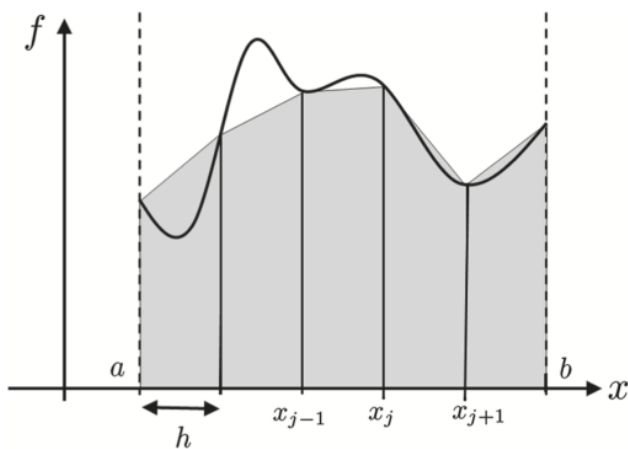
- ukladanie energie - účinnosť celého kontejnera pri ukladaní energie závisí od výkonu, pri ktorom sa daná energia ukladá:

$$\eta_{total} = \eta_{charging} \cdot \eta_{battery} \cdot \eta_{discharging}, \quad (1)$$

$$\eta_{total} = \eta_{DC/DC^2} \cdot \eta_{battery} \cdot \eta_{AC/DC^2}. \quad (2)$$

1.1.2 Zdroj energie FVE

Zdroje energie pre simuláciu sú vždy vzorkované hrubším intervalom, než je vlastný krok simulácie, napr. u stávajúcich historických dát fotovoltaickej elektrárne sú údaje logované každých 15 minút, a to buď v okamžitých výkonoch alebo v 15minutových energiách. K dosiahnutiu presnejšej integrácie energie medzi dvoma zdroji sa interpolovaným lichobežníkovým integrálom dopočítavajú medzibody.



Obr. 3. Interpolácia lichobežníkovým integrálom

1.1.3 Distribučná sieť

Simulácia využíva distribučné a dodávateľské modely v režime dodávky do distribučnej siete s vopred stanovenou tarifou:

- fixný poplatok (za RK / mesiac / kW),
- variabilné regulačné poplatky na odber (MWh),
- pokuta za prekročenie RK (kW).

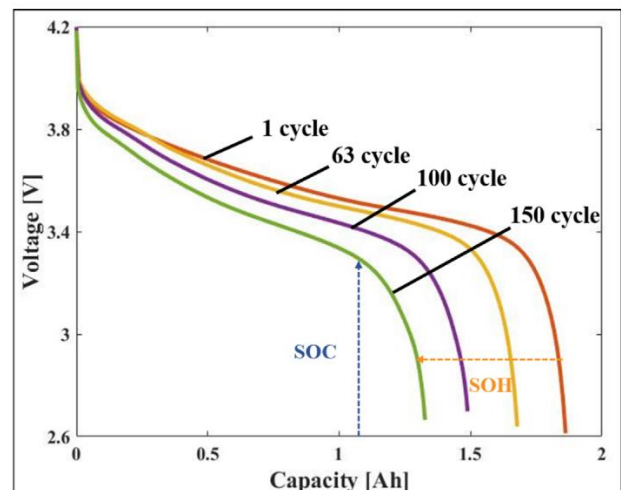
1.2 Metódy simulácie

Z dôvodu dosiahnutia maximálnej presnosti a s ohľadom na integračné problémy neistôt medzi logovanými údajmi poskytovanými existujúcimi zdrojmi energie sa využíva 1-minutový krok pri iterácii simulačných krokov. Dostatočná jemnosť krokov minimalizuje nepresnosť uloženaj/vydanej energie v situáciách, kde obmedzenie stavu nabitia nastane výrazne odlišne od vlastného kroku simulácie. Nepresnosť integrovanej hodnoty energie uloženaj v batériách by potom pri dlhodobej simulácii trvajúcej jeden rok a viac viedla k nerealistickému obrazu skutočného využitia reálneho batériového úložiska.

1.2.1 Výpočty vnútorných premenných

Hodnota SOC je vyjadrená v jednotkách kWh a je priebežne integrovaná v simulácii s každým iteračným krokom. Simulácia obsahuje ochranu pred prekročením hodnoty SOC nad 100 % alebo pod 0 %. Výpočet SOC prebieha v 1minutových krokoch a predpokladá lineárne využitie batérií, čo umožňuje nabíjanie až do 100 % výkonu a vybíjanie až na nulu, a to až do dosiahnutia plnej hodnoty SOC .

Hodnota SOH vyjadruje pomer aktuálnej kapacity batérie k jej nominálnej výrobnjej kapacite pri novom stave. Tato hodnota môže dosahovať až 100 %. S každým cyklom, ktorý batéria absoluuje, klesá hodnota SOH . V simulácii sa cyklus považuje za kompletný, pokiaľ sa súčet minútových energetických zmien pri nabíjaní a vybíjaní zhoduje s pohybom SOC od minima do maxima a naspäť. Jeden cyklus sa teda počíta ekvivalentnou energiou odpovedajúcou plnému vybitiu a plnému nabitíu batérie.



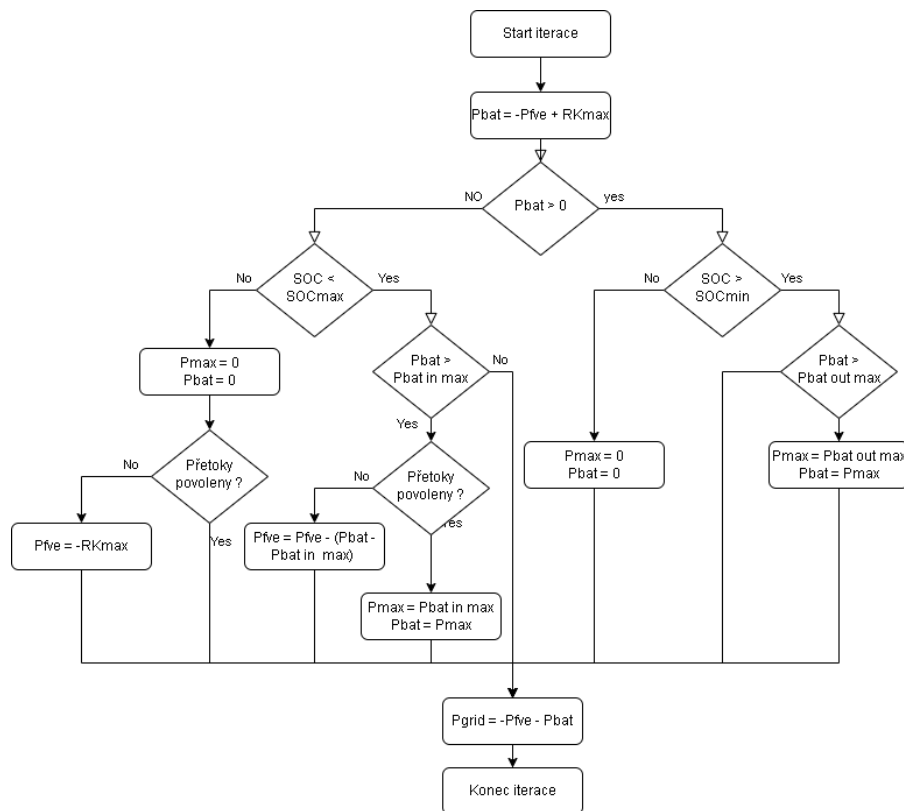
Obr. 4. Zmena závislosti kapacity batérie (SOC) v závislosti od životnosti (SOH) [2]

1.2.2 Výstup pre optimalizáciu

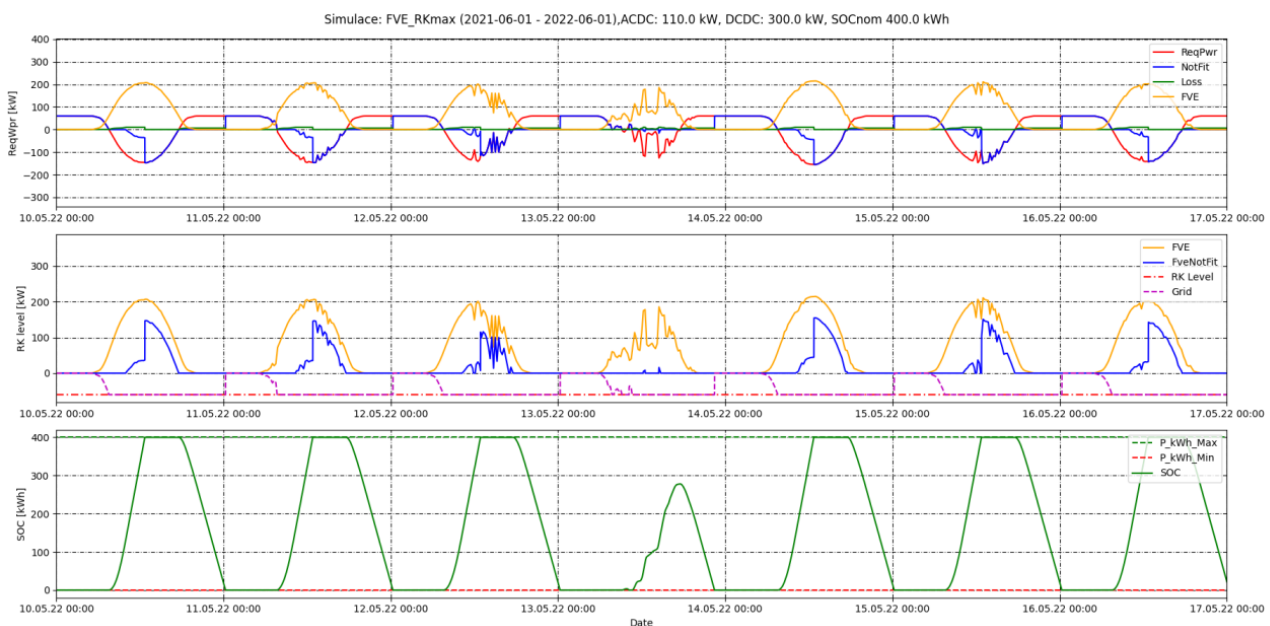
Simulácia vykonáva viacero simulačných prípadov, každý pre jednotlivú variantu SOC . Celkové výstupy všetkých simulačných variant exportujú celkovú prehľadovú tabuľku, ktorá obsahuje všetky koncové stavy všetkých variant. Pre úlohu nás zaujíma závislosť množstva dodanej energie do siete od kapacity SOC , ktorú optimalizujeme. Ich pomerom dostaneme kritériálnu funkciu, ktorá po optimalizácii zaistí najlepší pomer najviac predanej energie za najnižšie investičné náklady.

1.3 Princíp simulácie

Riadenie toku energie je postavené na princípe udržiavania hodnoty RK v mieste pripojenia FVE . Tato úroveň je kritická a nesmie byť prekročená. Programovo sa vypočíta veľkosť nabíjacieho výkonu do batérie, ktorý zodpovedá výkonu z fotovoltaickej elektrárne s odčítaním výkonu dodávaného do siete.



Obr. 5. Blokový diagram riadenia



Obr. 6. Týždenný priebeh simulácie - letné obdobie

V súlade so smerom toku energie batérie sa následne kontrolujú limity *SOC*. Pokiaľ je *SLBESS* plne nabitý, je nutné zabezpečiť, aby hodnota *RK* nebola prekročená. To možno dosiahnuť znížením výkonu *FVE* tak, že dočasne znížime výkon *FVE* tak, aby jej výkon do siete bol pod hodnotu *RK*. Pri simulácii kontajnera sú interne využívané premenné *Fit* a *NoFit*. Každý modul poskytuje hodnotu výkonu, ktorý môže v danom požadovanom okamihu dosiahnuť, t. j. premenná *Fit*, a časť, kedy ju nie je

schopný dosiahnuť, čo je označené ako premenná *NotFit*. Simulácie celého *SLBESS* prebieha nasledujúcim spôsobom z vyššej úrovne: Najskôr sa inicializujú a nakonfigurujú všetky potrebné parametre. Počas simulácie sa v každom iteračnom kroku vypočítava požiadavka na výkon zo *SLBESS* do distribučnej siete alebo opačne, pričom sa volá iteračná metóda výpočtu. V simulácii sú zahrnuté poplatky za služby a distribúciu elektrickej energie

(*EE*) a profity z predaja *EE*, pričom sa predpokladajú optimálne podmienky pre sieťové pripojenie *SLBESS*. V nasledujúcom diagrame riadenia je znázornený priebeh vyhodnocovania levelu *RK* a možnosti dodávať/odoberať *EE* do / z distribučnej siete.

- P_{fve} - výstupný výkon fotovoltaickej elektrárne,
- P_{bat} - požadovaný výkon po *SLBESS* (kladný alebo záporný),
- P_{max} - limit výkonu *SLBESS*,
- P_{grid} - výkon dodaný do distribučnej siete.

2 SIMULAČNÉ PRIEBEHY

Výsledné výstupné simulácie obsahujú tri základne časti zobrazovaných priebehov. Výstupné simulácie možno realizovať v rôznych nastaviteľných časových oknách.

Prvá časť zobrazuje:

- oranžová - priebeh výkonu *FVE*,
- červená - požadovaný výkon *SLBESS*,
- modrá - hodnota požadovaného výkonu, ktorý nedokáže *SLBESS* splniť,
- zelená - straty v prenose energie.

Druhá časť zobrazuje:

- oranžová - priebeh výkonu *FVE*,
- červená čiarkovaná - hodnota zadaného *RK*,
- fialová - výkon dodávaný do distribučnej siete,
- modrá - *FveNotFit* hodnota výkonu z *FVE*, ktorá nie je využitá k nabíjaniu ani nie je dodaná do distribučnej siete.

Tretia časť zobrazuje:

- zelená - priebežná hodnota *SOC*
- čiarkovaná - max/min limit *SOC*

Na obr.6 je týždňová simulácia v letnom období so zvolenými vstupnými parametrami:

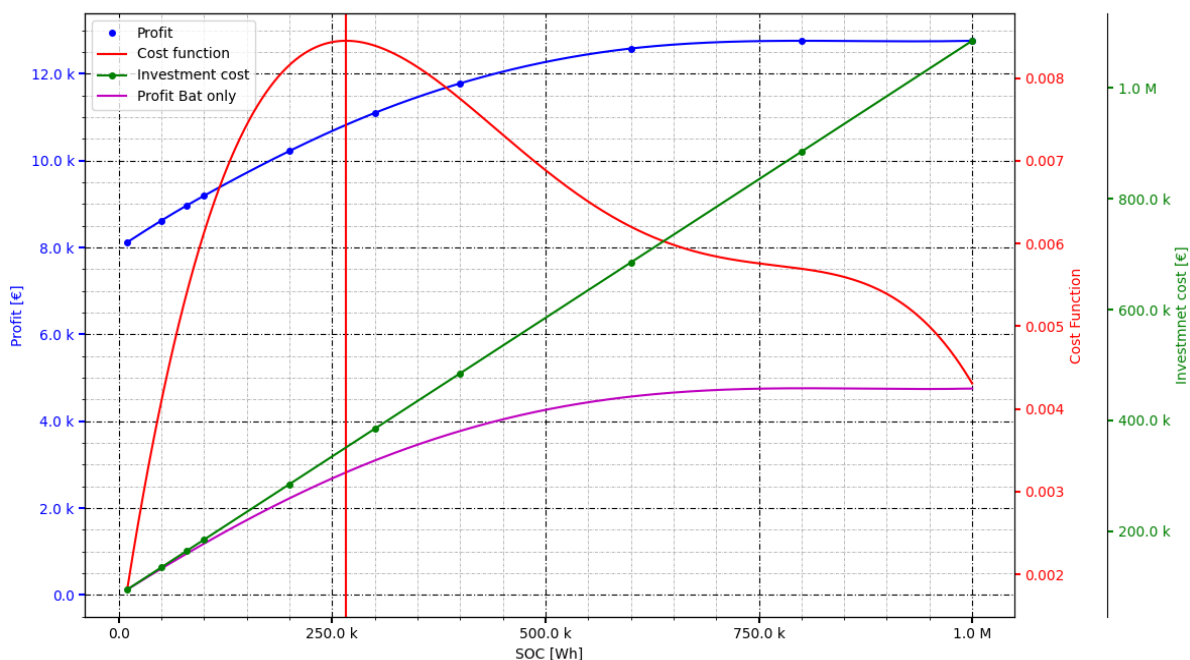
- $P_{AC/DC} = 110$ kW,
- $P_{DC/DC} = 150$ kW,
- $P_{FVE} = 250$ kWp,
- $SOC = 400$ kWh,
- $RK_{max} = 60$ kW.

3 OPTIMALIZÁCIA

V simulovanom scenári možno pozorovať, že batériové úložisko je najviac využívané v období s vysokým výkonom *FVE*. Inými slovami, v obdobiach bez výroby energie z *FVE* zostáva investícia nevyužitá, t. j. bolo by vhodné úložisko s menšou inštalovanou kapacitou *SOC*. Naopak, v obdobiach s veľmi produktívnou výrobou z *FVE* by bolo vhodné úložisko s väčšou inštalovanou kapacitou *SOC*. Z toho vyplýva úloha nájsť optimálnu kapacitu batériového úložiska tak, aby bol zisk z dodanej energie do siete čo najlepší pri čo najnižších investičných nákladoch.

Podľa výsledných priebehov v obr. 7 možno vybrať najvhodnejší pomer kapacity úložiska *SLBESS* voči požadovanej hodnote *RK* a veľkosti *FVE*, tak aby sa pri prevádzke maximalizoval zisk pri najnižších investičných nákladoch..

Optimalizačný výpočet je vykonaný pre hodnotu $RK = 60$ kW a inštalovaný výkon $FVE = 250$ kWp.



Obr. 7. Optimalizácia *SOC*

- modrá - celkový zisk z predaja energie do siete,
- fialová - zisk z predaja energie uloženej v batériách do siete,
- zelená - investičné náklady na *SLBESS*,
- červená - funkcia ceny.

Investičné náklady tvoria fixné a variabilné položky. Fixné zahŕňa: mechanické komponenty kontajnerového riešenia, elektro-výzbroj, stavebné úpravy a iné. Variabilná časť sa lineárne navyšuje s kapacitou (počtom batériových článkov) a výkonovým požiadavkám na meniče.

Optimálnu konfiguráciu SOC_{optim} pre čo najrýchlejšiu návratnosť možno stanoviť z krivky. Optimalizačná metóda je nájdenie minima polynómu štvrtého rádu pomocou funkcie derivácie. Konkrétna stanovená optimálna kapacita *SLBESS* pro vyššie zadané parametre je 266 kWh.

ZÁVER

S rastúcim rozvojom elektromobility rastie počet vyrobených batérií, ktoré bude potrebné recyklovať. Jednou z možností recyklácie je využitie opotrebovaných, ale stále funkčných batérií v energetických úložiskách, kde im je daný tzv. druhý život.

Táto štúdia na výpočet optimálnej kapacity *SLBESS* v spojení s *FVE* a s ohľadom na technické možnosti pripojenia *SLBESS* a *FVE* do siete, ktoré sú stanovené hodnotou *RK* naznačuje možnosti, ako pripojiť do siete *FVE* s výkonom vyšším ako je dovolená *RK* pre pripojenie takéhoto zdroja a to prostredníctvom využitia akumulácie.

Štúdiu možno ďalej rozširovať o optimalizáciu ostatných parametrov celkového riešenia, jak kapacitu *SLBESS*, tak navyiac aj o zmenu *RK*, veľkosť *FVE*.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Úložiská energie z batérií druhej životnosti/Second-life battery storage systems, ITMS2014+: 313012BNG4, 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] MUKHERJEE, N. - STRICKLAND, D. (2014): *Second life battery energy storage systems: Converter topology and redundancy selection*. In: 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Manchester, UK, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.0256.
- [2] LEE, J.-H. - LEE, I.-S. (2022): *Estimation of Online State of Charge and State of Health Based on Neural Network Model Banks Using Lithium Batteries*. In: School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, doi: 10.3390/s22155536.

Batérie druhej životnosti a systém správy batérií

Martin Šušal, Ing., PhD.*

ZTS – VÝSKUM A VÝVOJ, a.s.,

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

E-mail: martin.sunal@ztsvav.eu

Jaroslav Kopčan, Ing., PhD.

ZTS – VÝSKUM A VÝVOJ, a.s.,

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

E-mail: jaroslav.kopcan@ztsvav.eu

Denis Benka, Ing.

ZTS – VÝSKUM A VÝVOJ, a.s.,

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

E-mail: denis.benka@ztsvav.eu

Tomáš Kulhánek, Ing.

EnergyCloud, a.s.,

Studenská 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.

E-mail: kulhanek@energycloud.cz

Jan Jandík, Ing.

EnergyCloud, a.s.,

Studenská 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.

E-mail: jandik@energycloud.cz

Second Life Batteries and Battery Management System

Abstract: As electromobility continues to advance, there is a growing production of batteries that will eventually require recycling. One potential recycling approach involves repurposing worn yet still operational batteries in energy storage systems, providing them with a renewed functionality. Every battery assembly mandates a *Battery Management System (BMS)* to ensure proper and secure functionality. In the case of recycled cells, the *BMS* system becomes more intricate due to notable disparities in wear and, consequently, in parameters among the cells. Hence, active balancing of each cell within the assembly becomes imperative in such a setup. Furthermore, enhanced safety precautions are essential for such assemblies. The entire system must be scalable and adaptable to different numbers and configurations of battery cells from electric vehicles of various manufacturers.

Keywords: active balancing, *BMS*, electromobility, energy storage.

ÚVOD

S rastúcim rozvojom elektromobility a s tým súvisiacou výrobou batérií pre toto priemyselné odvetvie sa objavuje otázka budúcej recyklácie už vyslúžilých batérií. Batéria v elektrickom vozidle sa radí medzi jednu z najkritickejších súčastí. Pre batériách pre elektromobilitu je vyžadovaný veľmi vysoký pomer kapacity k veľkosti, či hmotnosti batérie, teda vyžadujeme čo možno najvyššiu kapacitu a čo najmenšie rozmery a najnižšiu hmotnosť batérie. Používaním elektrického vozidla sú batérie opotrebovávané a ich kapacita sa stále znižuje

a tým je obmedzovaný dojazd vozidla. Dojazd vozidla sa tak môže znížiť na veľmi nízku hodnotu, kedy sa môže stať používanie elektrického vozidla nepríjemné. Takto opotrebovaná batéria sa už na použitie vo vozidle príliš nehodí. Jednou z možností, ako tieto batérie so zníženou kapacitou naďalej používať je ich začlenenie do stacionárneho energetického úložiska. V tomto prípade nie je systém natoľko limitovaný priestorom a hmotnosťou ako elektrické vozidlo a zmenšená kapacita jednotlivých batérií je tu kompenzovaná ich celkovým počtom.

Týmto spôsobom môžeme batériám dať tzv. druhý život, kým budú definitívne vyradené [4].

1 SYSTÉM SPRÁVY BATERIÍ

Batériám sa v dnešnej dobe kladie čoraz náročnejšia úloha - poskytnúť spoľahlivé a dlhotrvajúce napájanie rôznym zariadeniam a systémom. A práve pre efektívne a bezpečné využitie batérií bola vyvinutá dôležitá technológia nazývaná „*Battery Management System*“ (*BMS*), čiže *Systém správy batérií*. Systém správy batérií hrá kľúčovú úlohu v monitorovaní a riadení stavu batérie. Pravidelne sleduje dôležité parametre, ako je napätie, teplota, prúd a stav nabitia batérií, aby získal ucelený obraz o aktuálnom stave batériového úložiska. Systém správy batérií umožňuje optimalizáciu prevádzky batériového úložiska, jeho efektívne a bezpečné využitie. Zvyčajne systém správy batérií implementuje tzv. balancovacie obvody, ktoré majú za úlohu vyrovnávať výrobné rozdiely medzi jednotlivými článkami celého úložiska [1-4].

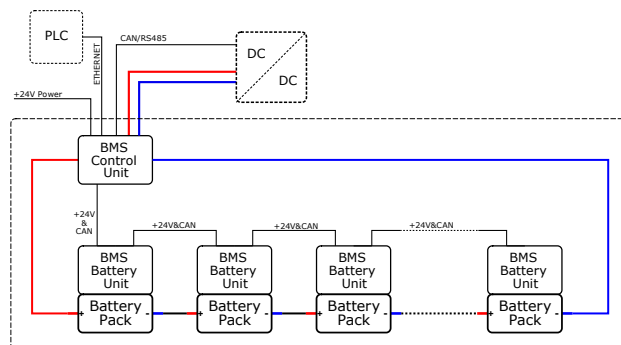
1.1 Požiadavky na systém správy batérií

Na správu batérií druhej životnosti sú kladené špeciálne požiadavky plynúce z ich opotrebovania. Batérie sú už používané a rôzne batérie môžu mať rôznu stupeň opotrebovania, a teda rôznu kapacitu, či rozdielny vnútorný odpor a ďalšie parametre. Takýto stav môže nastať aj pri rovnakom type batérií, ktoré majú rôznu stupeň opotrebovania. Tieto rozdiely musí systém efektívne kompenzovať. V praxi to znamená, že systém je vhodné vybaviť obvodmi zaisťujúcimi aktívne balancovanie jednotlivých článkov. V tomto prípade môžeme v batériovej zostave kombinovať aj články rôzneho chemického zloženia, ktoré majú rozdielne aj základné parametre, napr. napäťové hladiny. Použitie batériové články môžu byť ďalej náchylnejšie na zlyhanie, a preto je dôležité sledovať pri každom článku teplotu samostatným senzorom. Ďalej je vhodné, aby systém správy batérií druhej životnosti umožňoval variabilný počet pripojených batériových článkov, pretože zvyčajne sú batérie vo vozidle združované do modulov, ktoré nie je možné ďalej deliť a u každého výrobcu vozidla tento modul obsahuje rôznu počet batériových článkov.

2 ARCHITEKTÚRA SYSTÉMU SPRÁVY BATERIÍ

Navrhnutý systém správy batérií sa skladá z dvoch hlavných častí: riadiacej jednotky a batériových jednotiek. V reťazci je vždy jedna riadiaca jednotka a ďalej niekoľko batériových jednotiek, jedna vždy pre jeden batériový modul. Batériová jednotka sa skladá z dvoch častí, a to z dosky plošného spoja predného panelu, ktorý integruje riadiace a komunikačné časti batériovej jednotky, a ďalej až z troch monitorovacích

a balancovacích dosiek. Architektúra systému je ukázaná na obr. 1. Batériové jednotky komunikujú s riadiacou jednotkou pomocou zbernice CAN. Riadiaca jednotka zbiera namerané informácie z batériových jednotiek, s ktorými vykonáva určené výpočty a ďalej riadi batériovú zostavu a batériové jednotky. Ďalej riadiaca jednotka poskytuje napájacie napätie o veľkosti +24 V batériovým jednotkám.



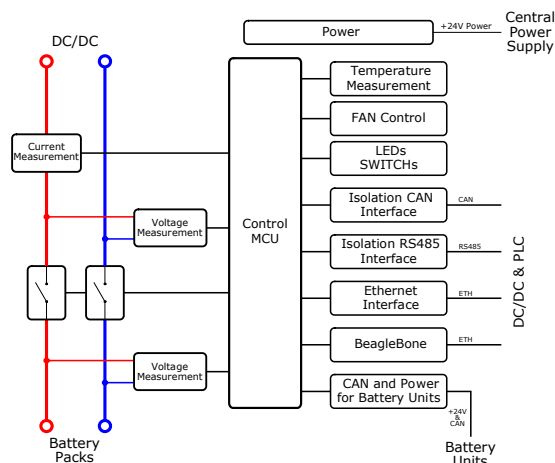
Obr. 1. Architektúra systému správy batérií

Riadiaca jednotka komunikuje s nadradenými systémami, ako je riadiaca PLC, či pripojený DC/DC menič k tejto batériovej zostave. Nadradenému systému odovzdáva informácie o batériovej zostave a jej aktuálny stav.

Počet batériových jednotiek môže byť všeobecne akýkoľvek. Prakticky je tento počet obmedzený priepustnosťou internej komunikácie CAN a potom aj celkovým napätím batériovej zostavy, ktoré by sa malo pohybovať medzi 800 V až 1000 V. Týmto je počet batériových jednotiek obmedzený na cca 16 až 20. Platí pre využitie každej batériovej jednotky maximálnym počtom článkov, teda osemnástich s napätím pohybujúcim sa do 4 V.

3 RIADIACA JEDNOTKA

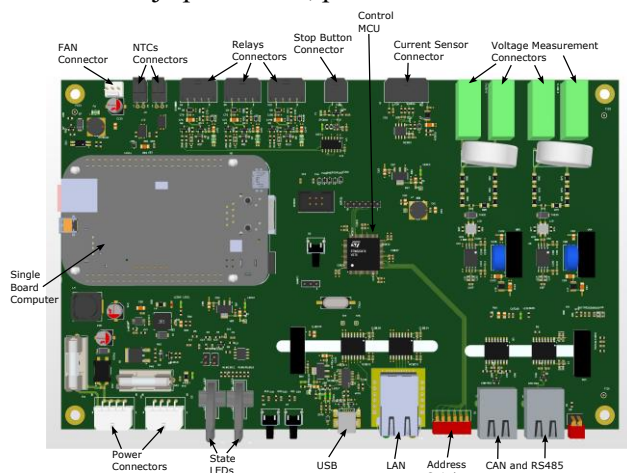
Riadiaca jednotka systému *BMS* alebo hlavná jednotka komunikuje s čiastkovými batériovými jednotkami, z ktorých zbiera informácie o jednotlivých batériových článkoch, teda hodnoty napätia a teplôt.



Obr. 2. Topológia riadiacej jednotky

Ďalej riadiaca jednotka meria celkové napätie batérovej zostavy a prúd tečúcou batérovou zostavou. Tieto hodnoty vstupujú do riadiacich podmienok a algoritmov, na základe, ktorých je riadené balancovanie jednotlivých článkov. Informácie o stave batérovej zostavy sú ďalej odovzdávané nadradenému systému, teda riadiacemu PLC či výkonovému DC/DC meniču. Na komunikáciu s nadradeným systémom môžu byť využité rozhrania CAN, Ethernet, či RS485.

Riadiaca jednotka ďalej integruje silové odpojovacie obvody, teda odpojenie kladného aj záporného výstupného pólu celej batérovej zostavy. Táto funkcia je veľmi dôležitá z hľadiska bezpečnosti a ochrany batérového úložiska, napr. pri havarijných stavoch ako je preťaženie, prehriatie či skrat.



Obr. 3. Návrh plošného spoja riadiacej jednotky

3.1 Riadiaci mikrokontrolér

Hlavnou súčasťou riadiacej jednotky je mikrokontrolér s označením *STM32G474VET6* z portfólia firmy *STMicroelectronics*, ktorý disponuje jadrom *ARM Cortex M4*. Mikrokontrolér pracuje s frekvenciou až 170 MHz a ponúka širokú škálu komunikačných a výpočtových periférií.

3.2 Komunikácia s externými systémami

Externá komunikácia je určená na prenášanie stavu batérovej zostavy okolitým systémom a systému pre riadenie celého systému energetického úložiska. Pre tieto účely riadiaca jednotka implementuje rozhrania CAN, RS485 a Ethernet. Rozhrania CAN a voliteľne RS485 sú primárne určené na komunikáciu s meničom DC/DC pripojeným k batérovej zostave. Rozhranie Ethernet je predovšetkým navrhnuté pre komunikáciu s riadiacim systémom, t. j. PLC pre riadenie úložiska. Riadiaca jednotka je tiež vybavená USB portom, ktorý umožňuje pripojenie osobného počítača s aplikáciou pre konfiguráciu systému.

3.3 Meranie prúdu

Meranie prúdu batérovej zostavy prebieha neinvazívnou metódou, pomocou tzv. prievlekového

snímača prúdu. Konkrétne je možné použiť snímač firmy *LEM* zo série s označením *HO 100-SP30*. V sérii sú dostupné snímače s nominálnym prúdom 50, 100, 150, 200 a 250 A. Je teda možné vybrať snímač s vhodným rozsahom pre danú aplikáciu. Napätový signál zo snímača je spracovávaný zosilňovačom a privedený na analógovo-digitálny prevodník v riadiacom mikrokontroléri.

3.4 Meranie napätia

Meranie napätia celej batérovej zostavy je implementované na dvoch miestach, a to na mieste pred silovými rozpínacími prvkami, teda na strane batérovej zostavy a za rozpínacími prvkami, teda na strane DC/DC meniča. Pokiaľ sú rozpínacie prvky v rozopnutom stave, je možné určiť napätie nezaťaženej batérovej zostavy aj napätie na výstupe DC/DC meniča. Ďalej je možné identifikovať, či došlo k rozopnutiu prvkov. Základnou časťou zapojenia merania napätia je precízny, galvanicky oddelený zosilňovač od firmy *Texas Instruments* s typovým označením *AMC1350*. Vstupné napätie je privedené cez napätový delič na vstup zosilňovača a diferenciálny výstup zosilňovača je pripojený k analógovo-digitálnemu prevodníku v riadiacom mikrokontroléri. Maximálne namerané napätie, a teda napätie celej zostavy, môže dosiahnuť až 1100 V.

3.5 Bezpečnostné odpojenie batérovej zostavy

V stave nečinnosti batérového úložiska, či v havarijnom stave úložiska, napr. pri prehriatí či preťažení, je nutné odpojiť silové vedenie, teda vysokonapäťový výstup batérovej zostavy. Odpojenie je realizované pomocou výkonových stýkačov v kladnej i zápornej vetve výstupného silového vedenia. Rozhodnutie o zopnutí, či rozopnutí odpojovacích prvkov vydá riadiaci mikrokontrolér. Ďalšou možnosťou rozpojenia silového vedenia je manuálne pomocou stop tlačidla. Signál stop tlačidla je spracovávaný logickým obvodom nezávislým na funkcii riadiaceho mikrokontroléra. Na odpojenie, resp. pripojenie batérovej zostavy sú vybrané výkonové vysokonapäťové stýkače z radu *HVC200*, *HVC300*, *HVC500* z portfólia firmy *TDK*.

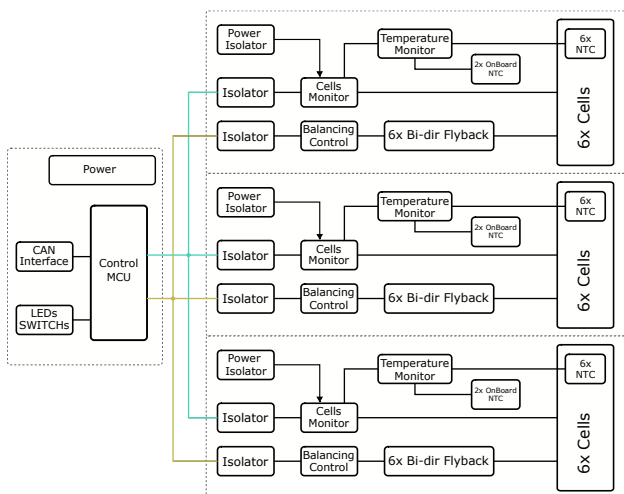
3.6 Jednodoskový počítač

V prípade, že nebude výpočtový výkon alebo funkcionálnosť riadiaceho mikrokontroléra dostatočná, je možné riadiacu jednotku vybaviť jednodoskovým počítačom *BeagleBone* s operačným systémom *Linux*. Pomocou počítača *BeagleBone* môžeme implementovať veľmi pokročilé riadiace a výpočtové funkcie a spracovávať namerané dáta pomocou pokročilých algoritmov, ako sú neuronové siete alebo *deep learning*. Ďalšou funkciou, ktorú *BeagleBone*

môže poskytovať, je implementácia webového servera. Týmto spôsobom môže byť vytvorená jednoduchá webová stránka, ktorá umožňuje správu batéριοvej zostavy. Namerané dáta môžu byť ukladané do databázy a graficky zobrazované obsluhu.

4 BATÉRIOVÁ JEDNOTKA

Batéριοvá jednotka je určená na správu jednotlivých batéριοvých článkov, ktoré sú súčasťou jednotlivých batéριοvých modulov. Batéριοvá jednotka sa ďalej skladá z dosky plošného spoja predného panelu a až troch monitorovacích a balancovacích dosiek plošných spojov. Doska predného panelu implementuje riadenie batéριοvej jednotky a komunikáciu s riadiacou jednotkou. Každá monitorovacia a balancovacia doska dokáže spravovať až 6 batéριοvých článkov. Batéριοvá jednotka umožňuje pripojiť až 18 batéριοvých článkov. Jednotka meria parametre pripojených článkov, vyhodnocuje ich a odovzdáva riadiacej jednotke. Batéριοvé jednotky s riadiacou jednotkou komunikujú pomocou zbernice CAN. Ďalej jednotka implementuje aktívny balancovací obvod pre každý článok. Jedná sa o balancovací obvod s obojsmerným flyback konvertorom a spoločnou napät'ovou zbernicou. Balancovacia funkcia je riadená algoritmi z riadiacej jednotky.



Obr. 4. Topológia batéριοvej jednotky

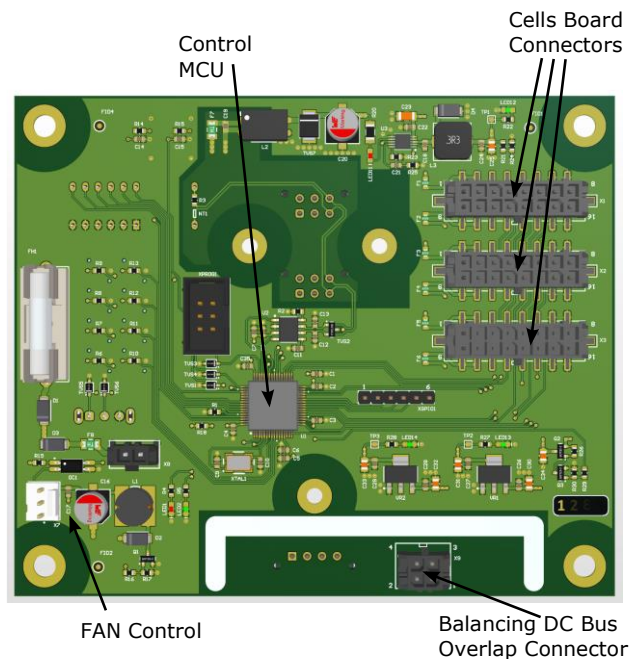
4.1 Doska predného panelu

Doska plošného spoja predného panelu je umiestnená v prednej časti batéριοvého modulu tak, aby konektory, spínače a LED signalizácia boli prístupné z vonkajšej časti modulu. Tieto prvky sú ukázané na obr. 6.

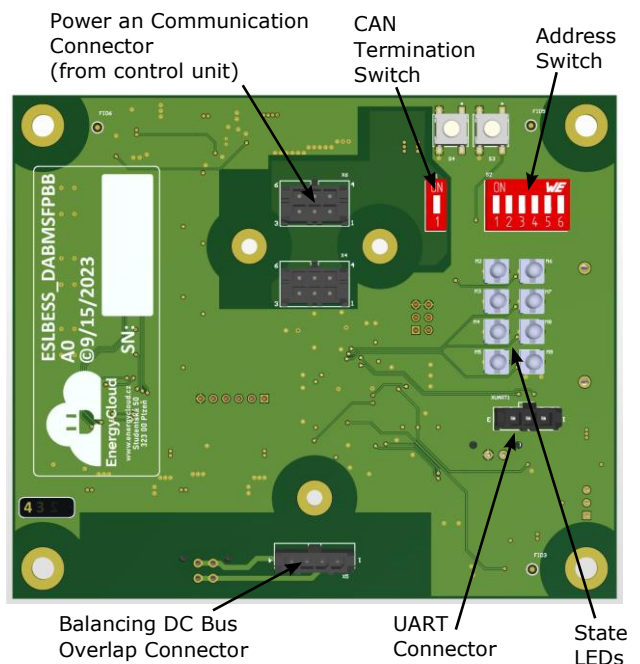
4.2 Riadiaci mikrokontrolér

Riadiaci mikrokontrolér ovláda jednotlivé časti batéριοvé jednotky, predspracováva namerané hodnoty a odovzdáva ich riadiacej jednotke. Ďalej

prijíma príkazy z riadiacej jednotky. Ide o mikrokontrolér z portfólia firmy *STMicroelectronic* s typovým označením *STM32F072R8T6TR*, ktorý disponuje jadrom *ARM Cortex-M0*.



Obr. 5. Doska plošného spoja predného panelu - horná strana



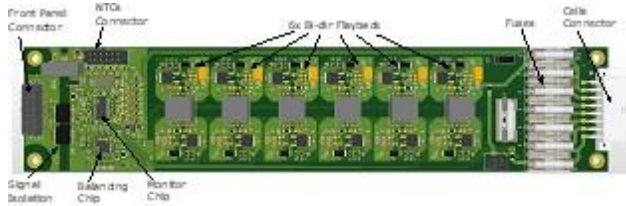
Obr. 6. Doska plošného spoja predného panelu - dolná strana

4.3 Monitorovanie batéριοvých článkov

Jednotka musí monitorovať napätie a teplotu každého článku v batéριοvom module. Meranie napätia musí byť vysoko presné, pretože aj malý rozdiel napätia (napr. 10 mV) môže viesť k degradácii článkov. Monitorovanie teploty každého článku zvyšuje spoľahlivosť a akékoľvek chyby je možné detekovať rýchlejšie ako pri monitorovaní článkov ako skupiny.

Na monitorovanie napätia a teploty článkov sa používa špecializovaný integrovaný obvod *LTC6811* [6]. Tento integrovaný obvod môže monitorovať až 12 batériových článkov s rôznym chemickým zložením, a teda rôznymi napäťovými parametrami. V tejto aplikácii monitoruje iba 6 článkov. Články sú pripojené pomocou obvodov ochrany pred prepätím a *RC* filtrov na redukcii šumu a rušenia. Pre monitorovanie teploty sa používajú *NTC* snímače, ktoré sú pripojené k zodpovedajúcim pinom *LTC6811* prostredníctvom multiplexora.

Obvod pre monitorovanie môže byť napájaný buď z batériovej zostavy alebo pomocou izolovaného napájacieho zdroja, pokiaľ nie je napätie článku dostatočne vysoké.



Obr. 7. Doska plošného spoja pre monitorovanie a balancovanie batériových článkov

4.4 Balancovanie batériových článkov

Batériová jednotka dokáže balancovať 18 batériových článkov. Pre každý článok využíva samostatný obojsmerný menič typu *flyback*. Každá doska pre monitorovanie a balancovanie batériovej jednotky má 6 nezávislých balancovacích meničov. Na rozdiel od pasívneho balancovania je proces aktívneho balancovania účinnejší a vedie k lepšiemu využitiu celkovej kapacity batériových článkov aj pri výrazných rozdieloch medzi jednotlivými článkami. Obojsmerný *flyback* menič dokáže efektívne vyrovnať nerovnováhy článkov ako počas nabíjania, tak aj počas vybíjania batériovej zostavy [3, 5]. Riadenie aktívneho balancovania jednotlivých článkov zaisťuje integrovaný obvod *LTC3300-2* [7], ktorý dokáže riadiť až šesť nezávislých obojsmerných *flyback* meničov. Integrovaný obvod *LTC3300* riadi tranzistory na primárnej a sekundárnej strane *flyback* transformátorov na základe prúdu pretekajúceho primárnym a sekundárnym vinutím. Prúdy na primárnej a sekundárnej strane sú snímané pomocou *shunt* rezistorov. Primárna strana každého meniča je pripojená k príslušnému batériovému článku. Sekundárne strany meničov sú na doske prepojené paralelne, tvoriace vyvažovaciu jednosmernú zbernicu.

4.5 Jednosmerná balancovacia zbernica

Jednosmerná balancovacia zbernica paralelne prepája sekundárne strany balancovacích meničov na jednej monitorovacej a balancovacej doske. Paralelne je vždy spojených 6 sekundárnych strán meničov. Táto

zbernica je potom pripojená na 12 batériových článkov. Záporný pól balancovacej zbernice je vždy pripojený k zápornému pólu prvého článku balancovanej sady šiestich článkov. Kladný pól je potom pripojený ku kladnému pólu dvanásteho článku. Týmto spôsobom sú balancovacie zbernice prepojené aj medzi jednotlivými batériovými modulmi. Preto je na doske plošného spoja predného panelu implementovaný konektor pre tzv. prekladanie balancovacích zbernic. Toto zapojenie je kľúčové pre funkciu balancovania naprieč celou batériovou zostavou. Výnimka v tejto konfigurácii je vykonaná pre poslednú šesticu článkov v zostave, kde je kladný pól pripojený k šiestemu článku.

4.6 Prepojenie častí batériovej jednotky

Doska plošného spoja predného panelu je s jednotlivými monitorovacími a balancovacími doskami prepojená *SPI* zbernicami a napájacím napätím. Pre riadenie monitorovacieho obvodu a balancovacieho obvodu sú využívané samostatné *SPI* zbernice. Obe zbernice sú zdieľané vždy pre každý typ integrovaného obvodu na všetkých monitorovacích a balancovacích doskách, ako je zrejme z obr. 4. Výber komunikácie s príslušným integrovaným obvodom je zaistený pomocou signálu *chip select*.

Na každej monitorovacej a balancovacej doske sú obe *SPI* zbernice galvanicky oddelené izolačným integrovaným obvodom. Napätie medzi riadiacimi obvodmi na doske predného panelu a obvodmi na monitorovacej a balancovacej doske môže dosahovať veľkosť napätia celej batériovej zostavy, teda až 1000 V. Preto je nutné galvanické oddelenie *SPI* zbernic vhodným integrovaným obvodom s dostatočnou elektrickou pevnosťou.

ZÁVER

S rastúcim rozvojom elektromobility rastie aj počet vyrábaných batérií, ktoré bude treba recyklovať. Jednou z možností recyklácie je využitie opotrebovaných, ale stále funkčných batérií v energetických úložiskách, kde im je daný druhý život. Každé také batériové úložisko musí byť vybavené systémom správy batérií alebo *BMS*. Tento systém má za úlohu monitorovať jednotlivé batérie, riadiť ich nabíjanie či vybíjanie a udržiavať úložisko v bezpečnom stave.

Navrhovaný systém počíta so špecifickými vlastnosťami už využitých batérií, hlavne s ich veľmi rozdielnymi parametrami ako kapacity, či napäťových parametrov. Z tohto dôvodu je napr. implementované aktívne balancovanie jednotlivých batériových článkov. Celý systém je škálovateľný a je možné ho prispôsobiť pre rôzny počet a konfiguráciu

batériových článkov z elektrických vozidiel rôznych výrobcov.

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] ZICH, J. - JANDIK, J. (2020): *Active Battery Management System for Home Battery Energy Storage*. In: 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, Czech Republic, pp. 1-4, doi: 10.1109/EPE51172.2020.9269172.
- [2] VALDA, L. - KOSTURIK, K. (2015): *Comparison of Li-ion active cell balancing methods replacing passive cell balancer*. In: International

Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, Czech Republic, pp. 267-270.

[3] JANDIK, J. (2020): *Active Battery Management System for Home Battery*. M.S. thesis, Faculty of Electrical Engineering., University of West Bohemia, Plzen.

[4] MUKHERJEE, N. - STRICKLAND, D. (2014): *Second life battery energy storage systems: Converter topology and redundancy selection*. In: 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Manchester, UK, pp. 1-6, DOI: 10.1049/cp.2014.0256.

[5] MOGHADDAM, A. F. - VAN DEN BOSSCHE, A. (2019): *Flyback Converter Balancing Technique for Lithium Based Batteries*. In: 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MOCASST.2019.8741893.

[6] *LTC6811 datasheet, Analog Devices (2023)*: Accessed on: Sep. 20, 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6811-1-6811-2.pdf>.

[7] *LTC3300-1 datasheet, Analog Devices (2020)*: Accessed on: May. 14, 2020. [Online]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3300-1.pdf>.

Štúdia vplyvu medziadaptéra na dynamické zaťaženie nosnej konštrukcie plošinového vozňa

Alyona Lovska, prof. Ing., Dr.Sc. Tech.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: alyona.lovska@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2660

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2550

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2560

Vadym Ishchuk, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2563

Study of the influence of the intermediate adapter on the dynamic load of the support structure of the platform wagon

Abstract: In order to reduce the dynamic load of the platform wagon, it is proposed to use an intermediate adapter between the frame and the load. The reduction of dynamic loads is carried out due to the dissipative forces that arise in the adapter when the wagon bounces. The results of mathematical modeling of the vertical loading of the platform wagon are given, taking into account the proposed solution. It was established that the accelerations acting on the supporting structure of the platform wagon are reduced by 8.5 % compared to the typical one. The acceleration acting on the load placed on the frame of the platform wagon is 11.8 % lower than that acting on it, taking into account the typical load perception scheme. The peculiarities of determining the strength of the adapter under its vertical load are highlighted. The conducted research will contribute to the creation of developments in the design of modern structures of railway vehicles.

Keywords: platform wagon, vertical load, load modelling, wagon dynamics indicators, cargo safety.

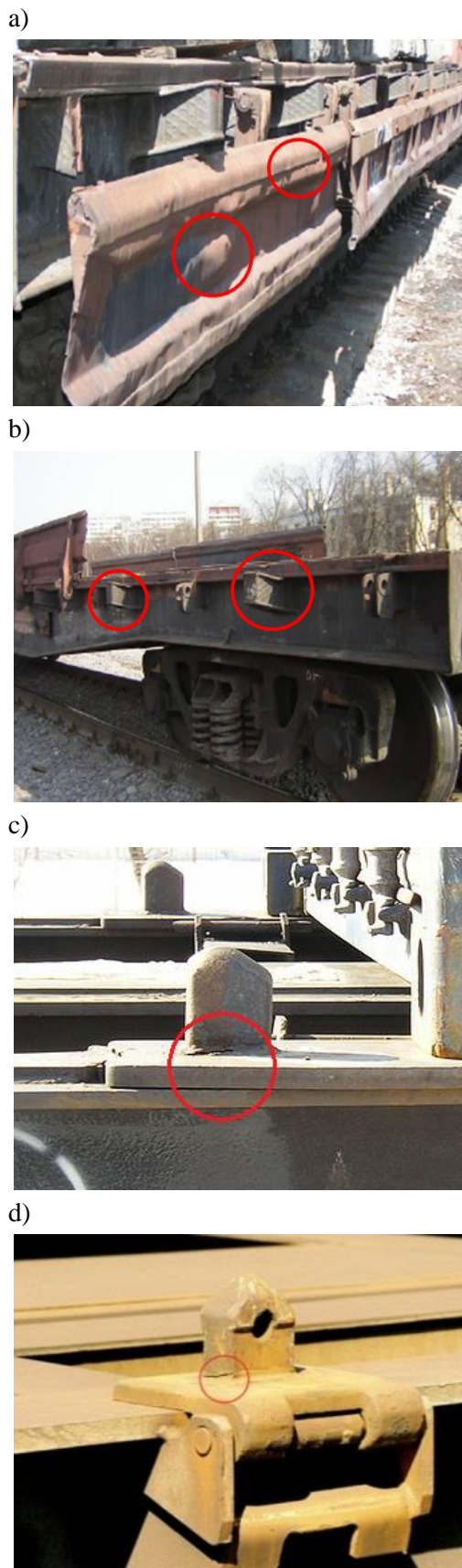
ÚVOD

Konkurenčný boj na trhu dopravných služieb vyvoláva potrebu zefektívniť prevádzkovanie železničnej dopravy pre udržanie si vedúcich pozícií. Je známe, že jedným z kľúčových aspektov prepravy tovaru po železnici je zaistenie jeho bezpečnosti.

V súčasnosti sú jedným z najpoužívanejších vozňov v medzinárodnej doprave plošinové vozne. Pri preprave nákladu plošinovými vozňami sú ich nosné konštrukcie vystavené konštantnému cyklickému zaťaženiu. V tejto súvislosti môže dôjsť k

poškodeniu ich nosných konštrukcií (obr. 1), ako aj bremien, najmä ak nie sú bezpečne upevnené. Takáto okolnosť si vyžaduje kompenzáciu zodpovedajúcich strát vlastníkom nákladu. Preto je účelné realizovať riešenia zamerané na zníženie dynamického zaťaženia tovaru pri železničnej preprave zlepšením nosných konštrukcií vozňov.

Analýza najnovších štúdií venovaných zlepšovaniu nákladných vozňov s cieľom znížiť vplyv dynamického zaťaženia na nosné konštrukcie nám umožnila vyvodiť záver o ich relevantnosti.



Obr. 1. Poškodenie nosných konštrukcií plošinových vozňov:
a) deformácia bočných stien, b) deformácia upevňovacích prvkov, c, d) praskliny v dorazoch trňov

Napríklad v publikácii [1] je vykonaná štúdia vplyvu funkčne odstupňovaných komôrkových sendvičových panelov na nosnú konštrukciu vozňa.

Uvádzajú sa výsledky testovania vylepšenej konštrukcie vozňa. Je dokázané, že táto implementácia je účelná. Je však dôležité povedať, že autori neskúmali problematiku dynamického zaťaženia vozňa, keďže táto realizácia bola navrhnutá s cieľom znížiť jeho vlastnú hmotnosť.

V práci [2] bolo navrhnuté riešenie na zníženie zaťaženia nosnej konštrukcie vozňa zavedením materiálu pohlcujúceho energiu do jeho komponentov. Zároveň sa predpokladá, že všetky nosné prvky konštrukcie skrine sú vyrobené z kruhových rúr. Implementácia takéhoto riešenia je však v praxi dosť náročná a vyžaduje vytvorenie vhodného systému údržby na udržiavanie vozňa v prevádzkyschopnom stave.

Za účelom zníženia zaťaženia skrine bolo v [3] navrhnuté riešenie na zvýšenie momentu odporu jeho komponentov. Dosahuje sa to zavedením viacvrstvových komponentov do konštrukcie skrine. Zároveň bol ako prototyp vybraný cisternový vozeň. Nebola ale skúmaná účinnosť tohto riešenia pre plošinové vozne.

Vlastnosti zaťaženia železničného vozňa komponentmi vyrobenými z kompozitného materiálu sú uvedené v článku [4]. Identifikujú sa hlavné nedostatky a výhody takejto implementácie, ako aj perspektívy jej ďalšieho rozvoja. Takéto zlepšenie si však vyžaduje značné kapitálové investície, čo obmedzuje množstvo jeho implementácie.

V práci [5] sa uvažuje o vhodnosti použitia panelov z kompozitných materiálov v nákladných vozňoch. Prezentované sú výsledky testov odolnosti kompozitných panelov. Je uvedený spôsob testovania panelov. Takáto modernizácia však neprispieva k zvýšeniu pevnosti rámu vozňa ako najviac zaťažovanej konštrukčnej jednotky v prevádzke.

Opatrenia na zníženie dynamického zaťaženia nosnej konštrukcie plošinového vozňa sú navrhnuté v publikácii [6]. Predpokladá sa, že ako podlaha budú použité sendvičové panely. Výsledky matematického modelovania dynamiky plošinového vozňa pri pohybe v prázdnom a naloženom stave po železničnej trati potvrdili realizovateľnosť takéhoto rozhodnutia. Táto realizácia zároveň nie je efektívna z hľadiska sériového využitia, nakoľko si vyžaduje dodatočné kapitálové investície na výrobu alebo modernizáciu vozňov.

Vykonaný prehľad literatúry dokazuje účelnosť výskumu znižovania nosných konštrukcií plošinových vozňov pre zaistenie bezpečnosti prepravovaného tovaru.

V tejto súvislosti je cieľom štúdie preskúmať vplyv medziadaptéra na dynamické zaťaženie nosnej konštrukcie plošinového vozňa.

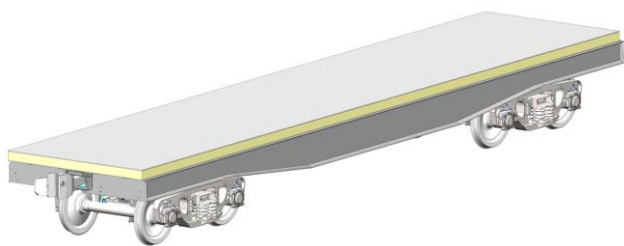
Na dosiahnutie tohto cieľa sú stanovené nasledujúce úlohy:

- určenie dynamického zaťaženia plošinového vozňa s medziadaptérom na umiestnenie nákladu,
- výpočet sily stredného adaptéra.

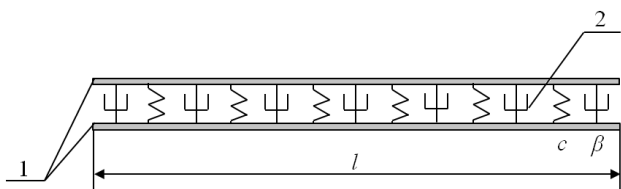
2 METODOLÓGIA

Na zníženie vplyvu vertikálnych dynamických zaťažení na nosnú konštrukciu plošinového vozňa, ako aj na zaistenie bezpečnosti na ňom prepravovaného nákladu, sa navrhuje použitie medziadaptéra (obr. 2).

Zvláštnosťou adaptéra je, že pozostáva z dvoch kovových platní, medzi ktorými je materiál absorbujúci energiu s elasticko-viskóznou charakteristikou (obr. 3). Použitie adaptéra medzi rámom vozňa a nákladom prispieje k absorpcii zvislých dynamických zaťažení, ktoré vznikajú pri kmitaní a pôsobení dynamického zaťaženia a zníži ich vplyv na náklad.



Obr. 2. Umiestnenie medziadaptéra na plošinovom vozni



Obr. 3. Konštrukčná schéma medziadaptéra: 1 - plechy, 2 - materiál s vlastnosťami absorbujúcimi energiu

Je potrebné povedať, že tento adaptér bude fungovať ako odnímateľný modul, ktorý nevyžaduje významnú zmenu nosných konštrukcií plošinových vozňov.

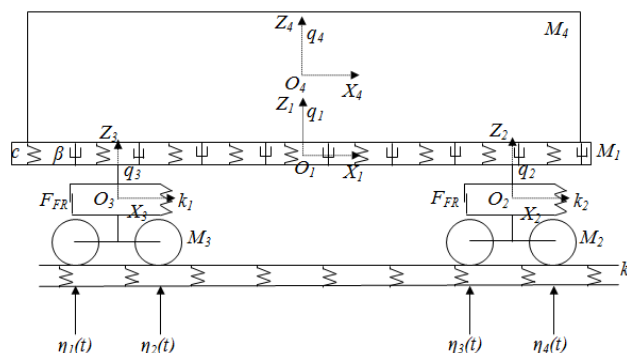
Na zdôvodnenie navrhovaného riešenia bolo vykonané matematické modelovanie dynamického zaťaženia plošinového vozňa vo vertikálnej rovine [6]. Štúdiá bola vykonaná na príklade plošinového vozňa, model 13-401 (obr. 4).

Schéma výpočtu plošinového vozňa je znázornená na obr. 5. Berie sa do úvahy, že plošinový vozeň pozostáva zo štyroch nadstavieb: rámu, dvoch vozíkov (model 18-100) a nákladu umiestneného na ráme. Náklad sa považuje za podmienený využitím plnej užitočnej nosnosti plošinového vozňa (70 ton).

Predpokladá sa, že plošinový vozeň sa pohybuje po železničnej trati, ktorá má elastické charakteristiky [6, 7].



Obr. 4. Plošinový vozeň, model 13-401



Obr. 5. Schéma výpočtu plošinového vozňa

Sústava diferenciálnych rovníc pohybu plošinového vozňa má tvar:

$$\begin{cases} M_1 \cdot \ddot{q}_1 + C_{1,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{1,2} \cdot \dot{q}_2 + C_{1,3} \cdot \dot{q}_3 = \\ -F_{FR} \cdot \left(\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2) \right) - \\ -c \cdot (q_1 - q_4) + \beta \cdot (\dot{q}_1 - \dot{q}_4), \\ M_2 \cdot \ddot{q}_2 + C_{2,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{2,2} \cdot \dot{q}_2 + B_{2,2} \cdot \dot{q}_2 = \\ = F_{FR} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2), \\ M_3 \cdot \ddot{q}_3 + C_{3,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{3,3} \cdot \dot{q}_3 + B_{3,3} \cdot \dot{q}_3 = \\ = F_{FR} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4), \\ M_4 \cdot \ddot{q}_4 = M_4 \cdot g - c \cdot (q_1 - q_4) + \\ + \beta \cdot (\dot{q}_1 - \dot{q}_4), \end{cases} \quad (1)$$

kde M_1 je hmotnosť nosnej konštrukcie plošinového vozňa,

M_2, M_3 - hmotnosť podvozkov,

S_{ij} sú charakteristiky pružnosti prvkov kyvného systému, ktoré sú určené koeficientmi tuhosti pružín pruženia k_T ,

k - tuhosť trate,

B_{ij} - disipatívne súčinitele,

F_{FR} - trecia sila v zostave pružiny podvozka,

δ_i - deformácie pružných prvkov pruženia,

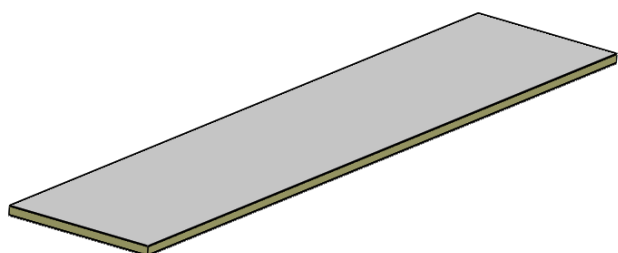
$\eta_i(t)$ - nerovnosť trate,

c - súčiniteľ tuhosti materiálu absorbujúceho energiu,

β - súčiniteľ viskózneho odporu materiálu absorbujúceho energiu.

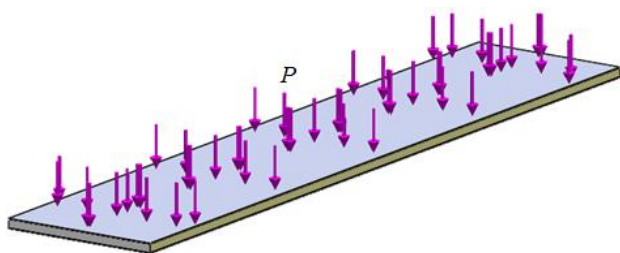
Riešenie sústavy diferenciálnych pohybových rovníc bolo realizované v softvéri *MathCad* [8, 9]. V tomto prípade sú začiatočné podmienky nastavené na nulu.

Výsledná hodnota zrýchlenia sa berie do úvahy pri výpočte pevnosti medziadaptéra. Na tento účel bol vytvorený jej priestorový model v programe *SolidWorks* [10, 11] (obr. 6). Berie sa do úvahy, že dĺžka adaptéra je $l = 13,3$ m a šírka je $b = 2,77$ m. To znamená, že hlavné geometrické parametre medziadaptéra sa rovnajú zodpovedajúcim parametrom rámu plošinového vozňa. Súčasne bola hrúbka plechov medziadaptéra určená *Bubnov-Galyorkinovou metódou* a bola asi 12 mm.

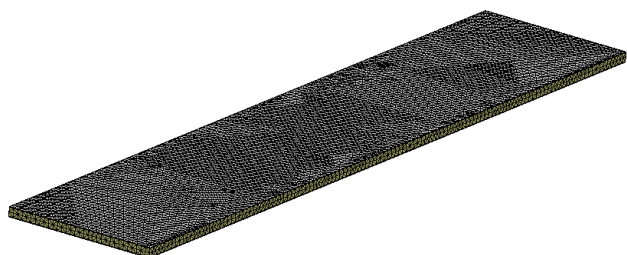


Obr. 6. Priestorový model medziadaptéra

Penový hliník sa používa ako materiál absorbujúci energiu. Výpočet pevnosti bol vykonaný metódou konečných prvkov v programe *SolidWorks Simulation*. Berie sa do úvahy, že plechy tvoriace adaptér sú vyrobené z ocele 09G2S. Upevnenie adaptéra sa uskutočnilo na vonkajšom povrchu spodnej platne. Súčasne sa aplikuje pevné upevnenie. Na vonkajší plech pôsobilo rovnomerne rozložené zaťaženie P (obr. 7).



Obr. 7. Schéma výpočtu medziadaptéra



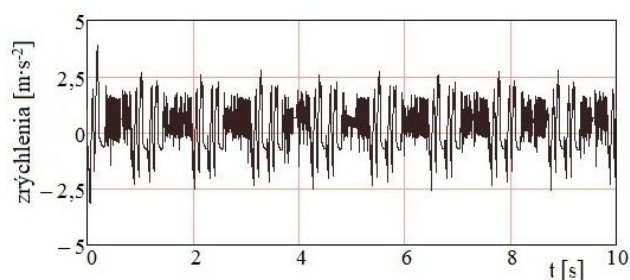
Obr. 8. Model konečných prvkov adaptéra

Model konečných prvkov adaptéra tvoria priestorové štvorsteny (obr. 8). Ich optimálny počet sa stanoví

graficko-analytickou metódou. Počet uzlov modelu bol 20 408 a počet prvkov bol 94 893.

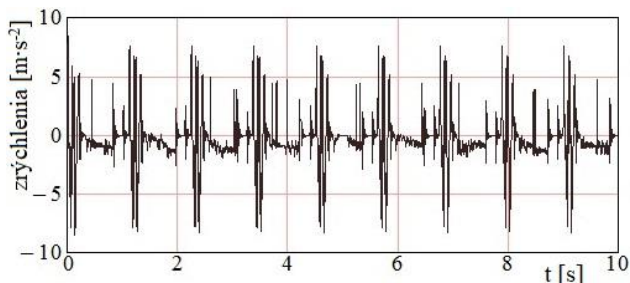
3 VÝSLEDKY

Výsledky stanovenia hlavných ukazovateľov dynamiky plošinového vozňa v stave pohybu v zaťaženom stave s klbovou nerovnosťou sú na obr. 9 až obr. 11. Zistilo sa, že maximálne zrýchlenia pôsobiace v ťažisku nosnej konštrukcie plošinového vozňa nastávajú v momente prejazdu nerovností na koľajnici a dosahujú hodnotu $3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (obr. 9). Pri nasledujúcom oscilačnom procese sa hodnota zrýchlenia znižuje a dosahuje $2,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. S prihliadnutím na navrhované riešenie je teda zrýchlenie pôsobiace na nosnú konštrukciu plošinového vozňa znížené o 8,5 % oproti typickému.



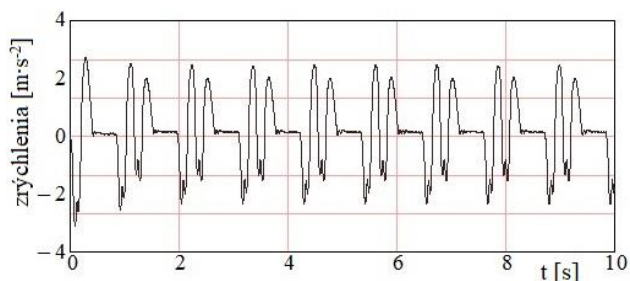
Obr. 9. Zrýchlenie plošinového vozňa v ťažisku

Zrýchlenie pôsobiace na vozíky je znázornené na obr. 10. Číselná hodnota zrýchlenia je asi $9,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Obr. 10. Zrýchlenie pôsobiace na podvozky

Zrýchlenie pôsobiace na zaťaženie umiestnené na ráme plošinového vozňa bolo $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (obr. 11).

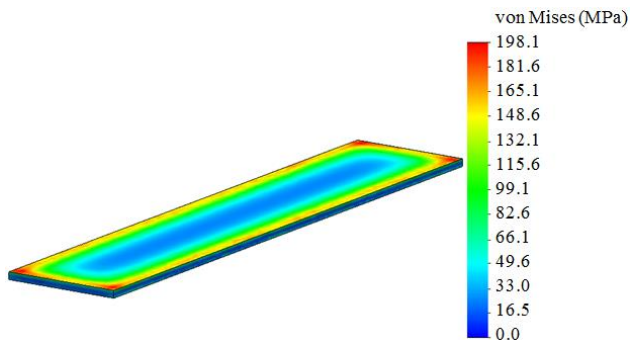


Obr. 11. Zrýchlenie pôsobiace na náklad

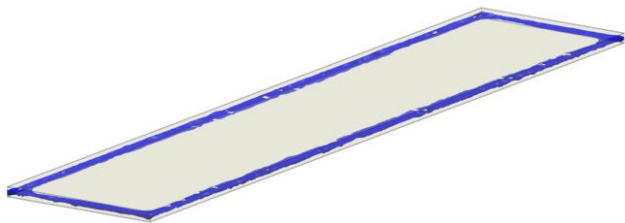
Výsledná hodnota zrýchlenia je o 11,8 % nižšia ako hodnota pôsobiaca na náklad, berúc do úvahy typickú schému rozloženia záťaženia.

V ďalšej fáze štúdie sa vypočítala sila medziadaptéra. Výsledky výpočtu sú znázornené na

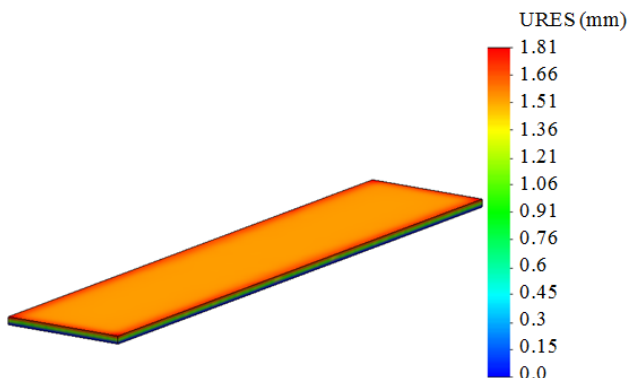
obr. 12 až obr. 14. Maximálne napätia zaznamenané v rohových častiach adaptéra sú 198,1 MPa (obr. 12). Uvedená hodnota napätí nepresahuje prípustnú hodnotu, ktorá je 210 MPa [12]. Preto je pevnosť adaptéra zachovaná. Najviac zaťažené oblasti adaptéra sú znázornené na obr. 13. Sú označené modrou farbou. Maximálne priehyby boli detekované v hornom plechu adaptéra a dosahujú 1,81 mm (obr. 14).



Obr. 12. Rozloženie napätí v konštrukcii medziadaptéra



Obr. 13. Najviac zaťažené oblasti medziadaptéra



Obr. 14. Priehyby v uzloch adaptéra

Ďalším vývojom tejto štúdie je zváženie otázok spojených s upevnením adaptéra na rám plošinového vozňa. Ďalej je možné skúmať možnosti využitia zvaraných materiálov na výrobu navrhutej konštrukcie [13, 14] a tiež prípadnú aplikáciu materiálov s nižšou mernou hmotnosťou pre dosiahnutie zníženia hmotnosti navrhutej konštrukcie [15].

ZÁVER

Obsahom prezentovaného príspevku bolo určenie dynamického zaťaženia plošinového vozňa s medziadaptérom na umiestnenie nákladu. Zistilo sa, že maximálne zrýchlenia, ktoré pôsobia v ťažisku nosnej konštrukcie plošinového vozňa pri pohybe v prázdnom stave, nastávajú v momente prejazdu

nerovnosti na koľajnici a dosahujú hodnotu $3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. S prihliadnutím na navrhované riešenie je teda zrýchlenie pôsobiace na nosnú konštrukciu plošinového vozňa znížené o 8,5 % oproti typickému. Zrýchlenie pôsobiace na vozíky bolo asi $9,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Zrýchlenie pôsobiace na zaťaženie umiestnené na ráme plošinového vozňa bolo $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Výsledná hodnota zrýchlenia je o 11,8 % nižšia ako hodnota pôsobiaca na záťaž, berúc do úvahy typickú schému vnímania záťaže.

Vykonaný výpočet pevnosti medziadaptéra. Maximálne napätia boli zaznamenané v jeho rohových častiach a dosiahli hodnotu 198,1 MPa, čo je o 5,7 % menej ako prípustná úroveň. Preto je pevnosť adaptéra zachovaná. Maximálne pohyby sa uskutočňujú v hornom plechu adaptéra a dosiahli hodnotu 1,81 mm.

Realizovaný výskum prispeje k vytvoreniu vývoja v oblasti navrhovania moderných konštrukcií koľajových vozidiel.

POĎAKOVANIE

„Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V01-00131.“

Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného program Vozidlá a motory.

LITERATÚRA

- [1] AL-SUKHON, A. - ELSAYED, M. S. (2021): *Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels*. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit, 236(8).
- [2] FOMIN, O. - GORBUNOV, M. - LOVSKA, A. - GERLICI, J. - KRAVCHENKO, K. (2021): *Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills*. In: Materials, 14(8), 1915.
- [3] JEONG, D. - TYRELL, D. - CAROLAN, M. - PERLMAN, A. B. (2009): *Improved Tank Car Design Development: Ongoing Studies on Sandwich Structures*. In: Proceedings of ASME Joint Rail Conference, March 3-5, Pueblo, Colorado, USA, pp. 1-10.
- [4] STREET, G. E. - MISTRY, P. J. - JOHNSON, M. S. (2021): *Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons*. In: J. Compos. Sci. 5, 152.
- [5] WRÓBEL, A. - PŁACZEK, M. - BUCHACZ, A. (2017): *An Endurance Test of Composite Panels*. In: Solid State Phenomena. 260, pp. 241-248.

- [6] LOVSKA, A. - NERUBATSKYI, V. - OKOROKOV, A. - VERNYHORA, R. - ZHURAVEL, I. (2023): *Determining loading patterns in the bearing structure of a railroad flatcar with a floor made from sandwich panels*. In: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/7 (123), pp. 6-13.
- [7] DOMIN, Y. V. - CHERNIAK, G. Y. (2003): *Fundamentals of wagon dynamics: a study guide* (In Ukrainian). Kyiv: KUETT, 269 p.
- [8] ZADACHIN, V. M. - KONIUSHENKO, I. H. (2014): *Numerical methods: tutorial* (in Ukrainian). Kharkov, 180 p.
- [9] HOI, T. P. - MAKHNEI, O. V. (2012): *Differential equations: a study guide* (In Ukrainian). Ivano-Frankivsk, 352 p.
- [10] KOZIAR, M. M. - FESHCHUK, YU. V. - PARFENIUK, O. V. (2018): *Kompiuterna hrafika: SolidWorks: Navchalnyi posibnyk*. Kherson: Oldi-plyus, 252 s.
- [11] PUSTIULHA, S. I. - SAMOSTIAN, V. R. - KLAKE YU. V. (2018): *Inzhenerna hrafika v SolidWorks: Navchalnyi posibnyk*. Lutsk: Vezha, 172 s.
- [12] DSTU 7598:2014 (2015): *Vantage carriages. For the first time to rebuild and design new and modernized cars with a gauge of 1520 mm (non-self-propelled)*. Kiev, 250 s.
- [13] UDVORKA, A. - BLATNICKÝ, M. - KOPAS, P. (2009): *Stress analysis of specimens for multiaxial fatigue testing*. In: TRANSCOM: 8-th European conference of young research and scientific workers. Žilina, June 22-24, Slovak Republic, pp. 135-138, ISBN 978-80-554-0031-0.
- [14] JAKUBOVIČOVÁ, L. - KOPAS, P. - BLATNICKÝ, M. (2011): *Strain and residual stress determinations of the welded specimen using FEM software*. In: Machine modeling and simulations. Trenčín: Faculty of industrial technologies, University of Alexander Dubček in Trenčín, pp. 57-64, ISBN 978-80-8075-494-5.
- [15] BLATNICKÝ, M. - BARTA, D. (2012): *Testing of lightweight construction materials of the transport means*. In: Logi: scientific journal on transport and logistics, Vol. 3, No. 1, pp. 23-35, ISSN 1804-3216.

Menič pre batériové úložisko využívajúce druhý život batérií

Stanislav Turza, Ing,*

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: stanislav.turza@energoaqua.sk

Martin Liška, Ing, PhD.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: martin.liska@energoaqua.sk

Ondrej Lipták, Ing,

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: ondrej.liptak@energoaqua.sk

Pavel Valenta, Ing, Ph.D.

Energycloud, a.s.,
Studentská 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.
E-mail: valenta@energycloud.cz

Jan Zich, Ing, Ph.D., MBA

Energycloud, a.s.,
Studentská 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.
E-mail: zich@energycloud.cz

Converter for Second-Life Battery Energy Storage System

Abstract: The global trend of electrification in automotive industry cause increasing the number of the batteries for the electric vehicles. The batteries that have reached the end of their primary life in electrical vehicle have a residual capacity. This residual capacity can be used in second-life batteries application. The energy storage system is on of this application. This article is focused on design and verification of the *DC/DC* converter prototype for this application. In the paper the prototype of interleaved three phase converter with power range up to 30 kW is describe.

Keywords: *Half-Bridge*, *DC/DC* converter, power converter, energy storage systems, second-life battery application.

ÚVOD

Celosvetový trend elektrifikácie v automobilovom priemysle zapríčiňuje nárast počtu batérií použitých v elektromobiloch. Bežne sú používané batérie využívajúce lítium.

Koniec životnosti batérie v elektromobile nastáva, pokiaľ jej kapacita poklesne približne na 70 % až 80 % jej počiatočnej kapacity. To samozrejme závisí od mnohých faktorov [1, 2]. Typická batéria v elektromobile má kapacitu rádovo desiatok kilowatthodín. Napriek tomu, že už taká batéria nie je príliš vhodná na prevádzku elektromobilu, má stále ešte nezanedbateľnú zvyškovú kapacitu.

Využitím tejto zvyškovej kapacity sa zaoberajú aplikácie druhého života batérií, ako sú napríklad úložisko elektrickej energie. Kde môže byť ich čiastočne znížená kapacita ďalej využívaná [3]. Táto téma je dnes veľmi aktuálna a diskutovaná. Často sa pre tieto aplikácie používa pojem z angličtiny „*second-life*“.

Použitie batérie z elektromobilov môžu slúžiť ako stacionárne úložné systémy, ktoré bývajú označované skratkou *SLBESS* z anglického „*Second-Life Energy Storage System*“. Tieto systémy môžu byť prevádzkované v kombinácii s obnoviteľnými zdrojmi energie, ako sú veterné či solárne elektrárne. Rovnako môžu pomáhať pri vyrovnávaní zaťaženia

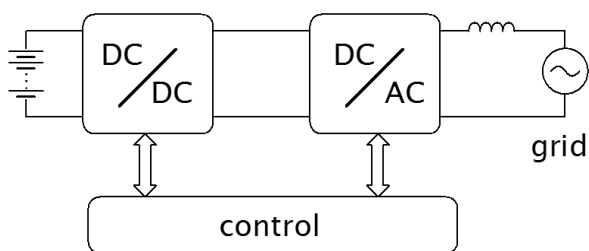
v rozvodnej sieti a podobne. Tento článok sa zaoberá predstavením návrhu *DC/DC* meniča pre aplikáciu v *SLBESS*.

1 ŠTRUKTÚRA *SLBESS*

Elektrochemické zdroje elektrickej energie, ako sú batérie z elektromobilov, sú zdrojmi jednosmerného napätia. Napätie batérie navyše závisí od viacerých faktorov. Najmä počtu jednotlivých článkov v batérii, ich usporiadanie a konkrétnom type použitých článkov. Rovnako sa napätie batérie mení v závislosti na aktuálnom stave nabitia. Z týchto dôvodov sú neoddeliteľnou súčasťou *SLBESS* elektronické meniče. Tieto meniče sú schopné upravovať jednosmerné napätie batérie na požadovanú hodnotu jednosmerného napätia (*DC/DC* meniča). Alebo sa jedná o striedače (*DC/AC*), ktoré menia jednosmerné napätie na striedavé napätie. Striedavým napätím môžu byť napájané pripájané spotrebiče, prípadne môže byť dodávané do siete.

Všeobecné je možné usporiadanie *SLBESS* popísať blokovo schémou naznačenou na obr. 1.

Všeobecná schéma *SLBESS* sa skladá zo samotnej batérie, *DC/DC* meniča, *DC/AC* meniča (striedač) a bloku riadenia. Tento článok sa zaoberá popisom prototypu *DC/DC* meniča.



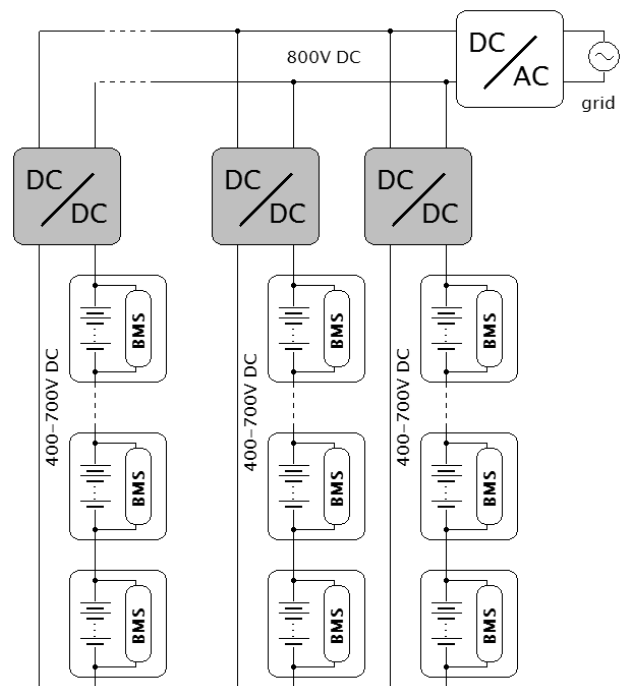
Obr. 1. Všeobecná blokovo schéma *SLBESS*

Existuje mnoho spôsobov, akým môžu byť batérie v úložisku spájané. Najčastejšie sa jedná o multi-modulárne riešenie, ktoré umožňuje paralelné pripojenie viacerých batérií na dosiahnutie väčšej kapacity úložiska. Rozdielne spôsoby spájania jednotlivých batériových celkov a ich dopad na celkovú spoľahlivosť takéhoto systému sú popísané napr. v [4].

Pre dosiahnutie väčšej variability a tým aj širšej využiteľnosti navrhovaného riešenia meniča sú v tomto projekte uvažované dve konkrétne koncepcie spájania použitých batérií.

2.1 Sériovo-paralelné zapojenie *SLBESS*

Prvá zo spomínaných koncepcií spájania batériových blokov, ktorá je uvažovaná v tomto projekte je sériovo-paralelné zapojenie. Blokovo schéma je naznačená na obr. 2.



Obr. 2. Sériovo-paralelné zapojenie *second-life* batériu pre *SLBESS*

V tomto prípade sú jednotlivé batériové zostavy spájané do série. Výsledné napätie je teda súčtom napätia jednotlivých batérií. V závislosti na použitých batériách, ich počte a stupni nabitia sa toto napätie môže pohybovať v rozsahu od 400 V do 700 V. *DC/DC* menič toto napätie zvyšuje na hodnotu 800 V. Toto napätie je ďalej premenené na striedavé napätie pomocou *DC/AC* meniča. Pokiaľ je potrebné batériové úložisko ďalej rozšíriť o ďalšiu kapacitu, je možné využiť viac týchto zostáv a pospájať ich na výstupnej strane meniča paralelne. *DC/DC* meniče potom pracujú do spoločného medziobvodu 800 V.

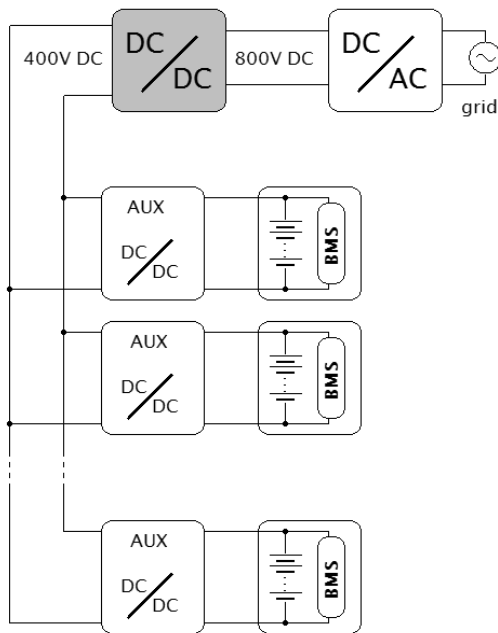
Každý batériový blok má vlastný BMS (*Battery Management System*). Ten sa stará o monitorovanie a balansovanie jednotlivých článkov v batérii. Stráži ich teplotu, stav nabitia a pod.

Táto koncepcia je vhodná v prípadoch, keď je napätie jednotlivých batériových blokov nižšie ako 250 V.

2.2 Sériové zapojenie *SLBESS*

Druhou uvažovanou koncepciou v tomto projekte je paralelné spájanie batériových blokov. Toto riešenie je vhodné pre prípady, keď napätie batérií je vyššie ako 250 V. V tomto prípade je ku každému batériovému bloku pripojený pomocný *DC/DC* menič (na obr. 3 označený ako *AUX*), ktorý zvyšuje napätie batériového bloku na hodnotu 400 V. Výstupy týchto pomocných meničov sú spojené paralelne do spoločného medziobvodu s napätím 400 V. K tomuto medziobvodu je potom pripojený *DC/DC* menič, ktorý toto napätie ďalej zvyšuje na hodnotu 800 V.

Aj v tomto prípade je nevyhnutné, aby každý batériový blok mal vlastnú BMS jednotku.



Obr. 3. Paralelné zapojenie *second-life* batériu pre SLBESS

3 DC/DC MENIČ PRE SLBESS APLIKÁCIE

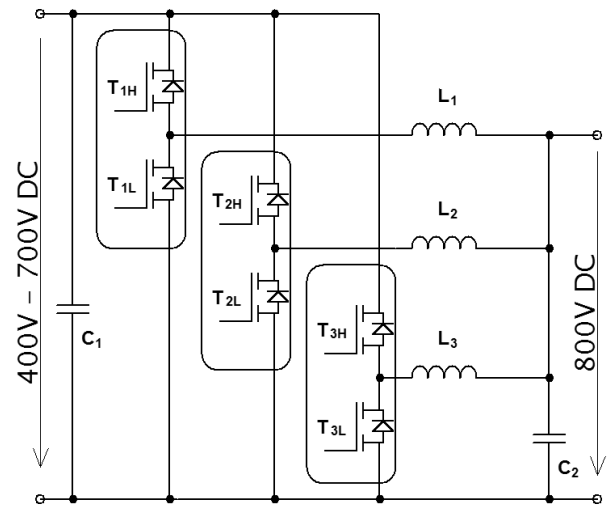
Ako už bolo spomenuté vyššie, zaoberá sa tento článok návrhom DC/DC meniča pre SLBESS aplikácie. V predchádzajúcich obrázkoch je tento menič označený šedivou farbou (obr. 2 a obr. 3) Aby bol navrhovaný menič variabilný, musí svojimi parametrami vyhovovať obom vyššie spomenutým variantom zapojenia SLBESS. Z tejto podmienky tiež plynú požiadavky na jeho parametre, najmä požiadavka na vstupné napätie. Požadované parametre meniča sú nasledujúce:

- rozsah vstupného napätia 400 V ÷ 700 V DC,
- menovité výstupné napätie 800 V DC,
- maximálny výstupný výkon 30 kW,
- možnosť prenášania energie oboma smermi.

3.1 Topológia DC/DC meniča

Kľúčová je požiadavka na schopnosť meniča pracovať obojsmerne (prenášať výkon oboma smermi - z batérie a do batérie). Kedy napätie batérie je vždy nižšie (400 V ÷ 700 V) ako požadované výstupné napätie (800 V). Topológia polovičného mostíka (*Half-bridge topology*) takúto prevádzku umožňuje. Také riešenie obsahuje dva spínacie prvky a jednu tlmivku, ktorá v tomto prípade slúži na akumuláciu energie. Z požadovaných parametrov je však zrejmé, že navrhovaný menič by mal byť schopný dodať relatívne vysoký výkon (30 kW). Návrh jednoduchého pol-mostíka dimenzovaný na takýto výkon by vyšiel veľmi neefektívny. Z toho dôvodu bolo pristúpené k využitiu viac fázového

pol-mostíka s prekladaním pracovných cyklov (*Interleaved multi-phase half-bridge topology*). Konkrétne bolo využité trojfázový mostík s prekladaním pracovných cyklov. Blokova schéma takého zapojenia je na obr. 4.

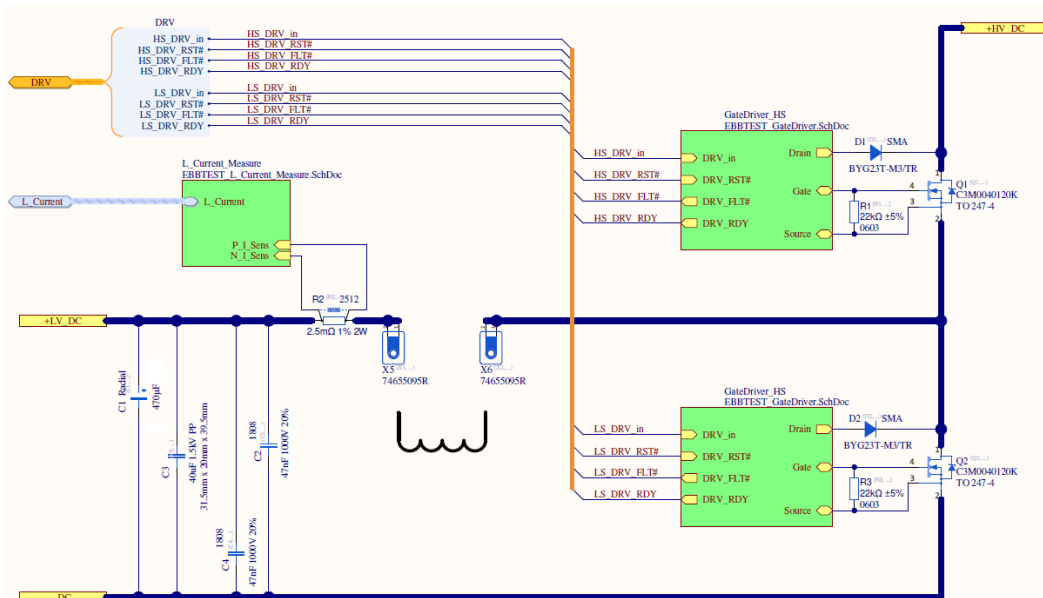


Obr. 4. Trojfázový pol-mostík s prekladaním pracovných cyklov

Ide v podstate o rozdelenie prenášaného výkonu medzi viacerými fázami meniča. Každá fáza meniča je samostatný menič s vlastnou dvojicou spínacích prvkov (v prípade obr. 4 sú spínacími prvkami MOSFET tranzistory) a vlastnou akumulacnou tlmivkou. Jednotlivé fázy meniča prenášajú časť celkového výkonu. Každá fáza meniča je riadená pulzne šírkovou moduláciou PWM (*Pulse Width Modulation*). PWM signály pre riadenie jednotlivých fáz sú však voči sebe vhodne fázovo posunuté. Pri vhodnom riadení meniča je prenášaný výkon rovnomerne distribuovaný medzi jednotlivé fázy. To umožňuje zmenšiť dimenzovanie jednotlivých prvkov meniča s ohľadom na prenášaný prúd. Na druhú stranu pri malom zaťažení meniča je možné niektoré fázy vyradiť z prevádzky a využívať napríklad iba jednu fázu. To umožňuje zvýšenie celkovej účinnosti meniča pri malom zaťažení. Rovnako použitie viacfázovej prekladanej topológie umožňuje znížiť zvlnenie výstupného napätia a tým aj znížiť nároky na výstupný filter v porovnaní s jednoduchým pol-mostíkom [5-7].

3.1 Prototyp navrhnutého DC/DC meniča pre SLBESS aplikácie

Pre zamýšľanú aplikáciu bol navrhnutý prototyp DC/DC meniča využívajúci topológiu popísanú vyššie. Vzhľadom k vysokému napäťovému namáhaniu spínacích prvkov v kombinácii s nutnosťou spínať relatívne vysoké prúdy boli ako spínacie prvky použité tranzistory na báze SiC (*Silicon Carbide*). Tieto tranzistory majú v porovnaní s bežnými kremíkovými MOSFET tranzistormi nižší



Obr. 5. Schéma zapojenia jednej fázy meniča navrhnutého v programe Altium Designer

odpor kanálu v zopnutom stave ($R_{DS(on)}$) pri vyšších napätiach.

Na obr. 5 je zobrazená schéma zapojenia jednej fázy meniča nakreslenej v programe *Altium Designer*.

Konkrétne sú použité tranzistory *C3M004012K* od výrobcu *Wolfsped* (tranzistory *Q1* a *Q2* na obr. 5). Parametre týchto tranzistorov sú nasledujúce [8]:

- odpor kanála $R_{DS(on)} = 40 \text{ m}\Omega$,
- maximálne napätie *drain-source* $U_D = 1200 \text{ V}$,
- maximálny prúd kanálom $I_D = 66 \text{ A}$,
- maximálny výstupný výkon 30 kW .

Schéma ďalej obsahuje bloky s budiacimi obvodmi pre tranzistory (na obr. 5 označené ako *GateDriver_LS* a *GateDriver_HS*). Tie sú založené na integrovaných budičoch *NCD57000DWR2G* od *ONSEMI* [9]. Tieto obvody zaisťujú budenie výkonových tranzistorov. Galvanicky oddeľujú výkonovú časť meniča od riadiacej časti. Rovnako monitorujú stav tranzistorov a zaisťujú funkciu desaturačnej ochrany (ochrán proti nadprúdu tranzistorom).

Ďalším kľúčovým prvkom meniča je akumulčná tlmivka. Jej návrh je v takejto aplikácii kritický. Z toho dôvodu bol pri tomto testovacom prototypu meniča zvolený spôsob pripojenia tlmivky pomocou skrutkovacích svoriek. Toto riešenie umožňuje jednoduchú výmenu tlmivky a jej otestovanie.

Ďalej je na obr.5. Obsiahnutý blok označený *L_Current_Measure*. Tento blok slúži na meranie prúdu akumulčnou tlmivkou. Tento prúd je snímaný ako úbytok napätia na snímacom rezistore *R2*. Blok merania prúdu sníma úbytok napätia, zaisťuje jeho zosilnenie a galvanické oddelenie od riadiacej časti. Informácie o prúde tlmivkou je potom ďalej

odovzdávaná riadiacej časti. Kondenzátory *C1* až *C4* tvoria vstupný kapacitný filter pre každú fázu meniča.

3.1.1 Prototyp akumulčnej tlmivky

Akumulčná tlmivka je jedným z kľúčových prvkov meniča. Jej vlastnosti ovplyvňujú celkovú účinnosť meniča a ďalšie dôležité vlastnosti. Pre prvotné testovanie bola navrhnutá akumulčná tlmivka zobrazená na obr. 6.



Obr. 6. Prototyp akumulčnej tlmivky pre navrhovaný menič

Jadro tlmivky je tvorené štvoricou feritových jadier *E80*. Efektívna plocha magnetického obvodu je 1198 mm^2 . Uprostred jadra je vytvorená vzduchová medzera. Vinutie tlmivky tvorí 32 závitov navinutých vysokofrekvenčným lankom s efektívnym prierezom cca 15 mm^2 .

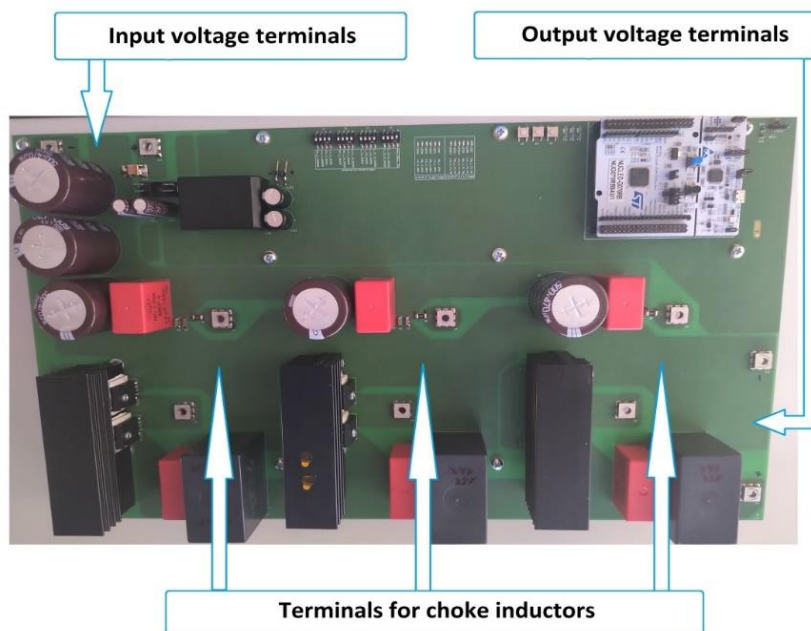
3.1.2 Riadenie meniča

Riadenie meniča zaisťuje 32 bitový mikrokontrolér *STM32G070RBT6* od *STMicroelectronics*. Tento mikrokontrolér je umiestnený na vývojovej doske *NUCLEO*. Tento mikrokontrolér zaisťuje generovanie troch fázovo posunutých *PWM* signálov pre riadenie spínacích tranzistorov. Rovnako zaisťuje, pomocou interných *AD* prevodníkov, meranie všetkých analógových veličín. Rovnako zaisťuje reguláciu výstupného napätia a softvérové stráženie limitných stavov.

Stráženie limitných stavov je na meniči realizované ešte formou nezávislého hardvéru. Pokiaľ by z nejakého dôvodu zlyhalo riadenie meniča, potom hardvérové ochrany sú schopné, v prípade prekročenia limitných stavov (prekročenie napätia, nadprúd, prehriatie a pod.) bezpečne vypnúť menič nezávisle na riadiacom softvéri.

3.1.3 Prototyp meniča

Na obr. 7 je fotografia prototypu meniča. Menič je realizovaný na štvorvrstvovej doske plošných spojov.



Obr. 7. Prototyp navrhnutého meniča

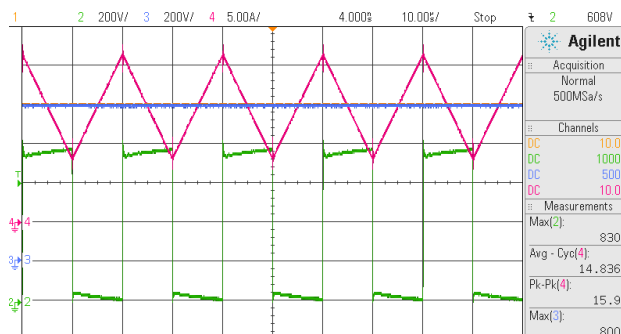
Na doske je umiestnená riadiaca *NUCLEO* doska s mikrokontrolérom, pripojovacie svorky meniča a svorky na pripojenie akumuláčnych tlmiviek.

4 MERANIE NA PROTOTYPE A DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Na tomto prototype bolo vykonané testovanie a meranie vlastností navrhnutého meniča. Všetky uvedené výsledky boli namerané za nasledujúcich podmienok:

- vstupné napätie 400 V,
- výstupné napätie 800 V,
- spínacia frekvencia tranzistorov 50 kHz,
- fázový posuv medzi jednotlivými fázami meniča 120°.

Na obr. 8 je zobrazený *oscilogram* zachytený na jednej fáze meniča počas testovania.



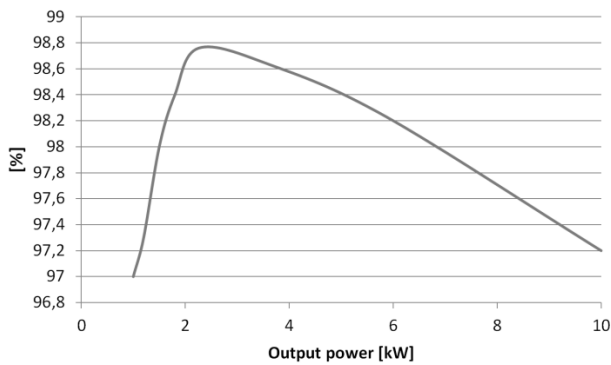
Obr. 8. *Oscilogram* z testovania meniča (výstupný výkon 6 kW na jednu fázu)

Ide o priebehy veličín v čase. Červený priebeh je prúd akumuláčnou tlmivkou, zelený priebeh je napätie na spodnom spínacom tranzistore a modrý

priebeh je výstupné napätie meniča. *Oscilogram* bol zaznamenaný pri výstupnom výkone na jednej fáze 6 kW.

Ďalej bola zmeraná účinnosť meniča v závislosti na jeho zaťaženie. Nameraná závislosť je na obr. 9.

Z grafu je zrejmé, že pri maximálnej záťaži je účinnosť meniča cca 97,2 %. Najvyššia účinnosť 98,75 % menič vykazuje pri záťaži cca 2,4 kW na jednu fázu, teda celkovom výstupnom výkone 7,2 kW.



Obr. 9. Závislosť účinnosti meniča od jeho zaťaženia (uvedený výstupný výkon je na jednu fázu meniča)

ZÁVER

Vzhľadom na celosvetový trend elektrifikácie v automobilovom priemysle je v súčasnej dobe aktuálnou témou využitie doslužilých akumulátorov z elektromobilov veľmi aktuálne. Cieľom tejto práce bolo navrhnuť DC/DC menič pre energetické úložisko, ktoré využíva použité akumulátory z elektromobilov tzv. SLBESS (Second-Life Battery Energy Storage System).

Z požiadaviek na vyššiu variabilitu systému, a možnosť prispôbiť batériové úložisko rôznym akumulátorovým zostavám, vzišli požadované parametre meniča. Navrhnutý a menič je schopný pracovať so vstupným napätím v rozsahu od 400 V do 700 V. Výstupné napätie meniča je 800 V. Celkový výstupný výkon meniča je 30 kW a menič umožňuje obojsmerný prenos energie.

Testovaním bola overená funkčnosť prototypu a bolo okrem iného vykonané aj meranie účinnosti meniča. Menič dosahuje maximálnu účinnosť 98,75 % a účinnosť pri plnom zaťažení je 97,2 %.

Skúsenosti získané pri návrhu a testovaní meniča budú ďalej využité pri ďalšom vývoji. Následné kroky v tomto smere budú zamerané napríklad na úpravu navrhnutého plošného spoja. Konceptcia zvolená pre tento prototyp, kedy sú všetky komponenty na jednom plošnom spoji, nie je príliš vhodná a komplikuje návrh plošného spoja. Ako vhodnejší variant sa javí použiť samostatná plošný spoj pre výkonovú časť meniča. Ďalší samostatný plošný spoj pre budiace obvody tranzistorov. Tretí plošný spoj bude obsahovať riadiace obvody. Táto modulárna koncepcia tiež umožní prípadné ľahšie rozšírenie meniča o ďalšie fázy.

Podakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Úložiská energie z baterií druhej životnosti / Second-life battery storage systems, ITMS2014+: 313012BNG4, ktorý je súčasťou významného projektu spoločného európskeho záujmu

(IPCEI) s názvom European Battery Innovation programe Integrovaná infraštruktúra, kód výzvy: OPII-MH/DP/2021/9.5-34, spolufinancovaný zo zdrojov Evropského fondu regionálneho rozvoja.

LITERATÚRA

- [1] SCOTT B. PETERSON - JAY APT - WHITACRE, J. F (2010): *Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization*, In: Journal of Power Sources, Vol. 195, No. 8, pp. 2385-2392, ISSN 0378-7753.
- [2] LIU, W. - DELACOURT, C. - FORGEZ, C. - PELLISIER, S. (2011): *Study of graphite/NCA Liion cell degradation during accelerated aging tests - Data analysis of the SIMSTOCK project*, In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, USA, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2011.6043110.
- [3] STRICKLAND, D. - CHITTOCK, L. - STONE, D. A. - FOSTER, M. P. - PRICE, B. (2014): *Estimation of Transportation Battery Second Life for Use in Electricity Grid Systems*, In: IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 3, pp. 795-803, doi: 10.1109/TSTE.2014.2303572.
- [4] MUKHERJEE, N. - STRICKLAND, D. (2014): *Second life battery energy storage systems: Converter topology and redundancy selection*, In: 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Manchester, UK, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.0256.
- [5] WWANG, J. et al. (2021): *An Efficiency Optimization Control Method for Three-Phase Interleaved DC-DC Converter*, In: 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), Chengdu, China, pp. 285-289, doi: 10.1109/AEEES51875.2021.9403039.
- [6] ZHANG, P. - LIU, Y. - ZHAO, J. - ZHANG, H. - LV, Q. (2021): *An Efficiency Optimization Control Method With Fast Dynamic Response For Multi-Phase Interleaved BUCK Converter*, In: IECON - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, ON, Canada, pp. 1-5, doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589403.
- [7] BABA, D. (2012): *Benefits of a multiphase buck converter*, In: Texas Instruments Incorporated.
- [8] C3M004012K Datasheet, Wolfspeed (2023): Accessed on: September 25, [online]. Available: https://assets.wolfspeed.com/uploads/2023/08/Wolfspeed_C3M0040120K_data_sheet.pdf.
- [9] NCD57000DWR2G Datasheet, Onsemi (2023): Accessed on: September 25, [online]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ncd57000-d.pdf>.

Tepelný model energetického úložiska s batériami druhej životnosti

Richard Žilka, Ing.*

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: richard.zilka@energoaqua.sk

Ondrej Krško, Mgr., PhD.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská Republika.
E-mail: ondrej.krsko@energoaqua.sk

Martin Liška, Ing. , PhD.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: martin.liska@energoaqua.sk

Stanislav Louvar, Ing.

EnergyCloud, a.s.,
Studená 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.
E-mail: louvar@energycloud.cz

Jakub Novotný, Ing.

EnergyCloud, a.s.,
Studená 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.
E-mail: novotny@energycloud.cz

Thermal model of the Second-life Battery Energy Storage Systems as a building block for digital twin

Abstract: A *Second-life Battery Storage Systems* are a promising direction of how to optimize costs in modern smart grids. although they may help to reduce costs, they represent very sensitive components which imposes a high demand on their design and control. A promising direction is so called "digital twin" approach where particular sub-systems are designed and optimized in a simulations or co-simulations without the need to invest in to the real hardware. Such mathematical models are usually quite complex due to highly nonlinear nature of the system and they require a high degree of understanding of the problem to successfully implement them. In this paper we deal with the design of thermal mathematical description of the battery storage system as a building block of the overall mathematical model. Specifically, we focus on simple implementation and low complexity while achieving sufficient precision of the model. Proposed model was verified in simulations using real measured data.

Keywords: thermal model, digital twin, second-life battery energy storage, *Python*.

ÚVOD

Moderné energetické systémy sa čoraz viac orientujú na decentralizované elektrické siete a s tým sa objavuje nový trend - *mikrosiete*, známe aj ako *MicroGrids*. Tieto mikrosiete sú malé, autonómne energetické systémy, ktoré môžu byť prepojené s hlavnou elektrickou sieťou alebo fungovať nezávisle. V tejto novej ére zohráva kľúčovú úlohu používanie batérií druhej životnosti (*Second Life Batteries*) v rámci tzv. *SLBESS* (*Second Life Battery Energy*

Storage System). Je to fáza životného cyklu batérie, ktorá nastáva po jej prvom použití, napr. v elektrických vozidlách. *Lítium-iónové* batérie, pôvodne určené pre elektrické vozidlá, sa teraz používajú v kontexte *SLBESS*, kde slúžia na uskladnenie energie. Táto transformácia batérií do druhej fázy životného cyklu predstavuje inovatívny prístup k udržateľnému využívaniu zdrojov.

Batérie, ktoré už neposkytujú dostatok energie na pohon vozidiel, môžu stále účinne slúžiť ako

zásobníky energie pre mikrosiete a iné decentralizované energetické systémy [1]. Zohľadnenie druhej životnosti batériových článkov minimalizuje vplyv na životné prostredie a zároveň optimalizuje celkovú nákladovú efektívnosť [2-5]. Táto inovácia prináša výhody tak pre energetický sektor, ako aj environmentálnu udržateľnosť a umožňuje predĺženie používania batérií v novom kontexte energetických výziev 21. storočia [6].

1 ANALÝZA PROBLEMATIKY

Moderný energetický priemysel kladie dôraz na používanie *litium-iónových* batérií, kľúčových komponentov, ktoré zohrávajú významnú úlohu v celkových nákladoch. Na efektívne využívanie týchto batérií je nevyhnutné vyvinúť spoľahlivé matematické modely, ktoré umožnia simuláciu a optimalizáciu systémov. Vývoj počítačového hardvéru otvára možnosť vytvárania digitálnych dvojčiat systémov, čo umožňuje prijímať rozhodnutia o návrhu a riadení bez potreby fyzického systému.

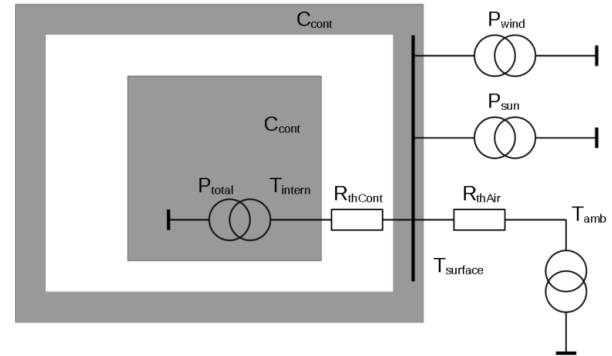
Matematický model systému skladovania energie z batérií druhého života (*SLBESS*) je silne nelineárny, čo si vyžaduje kompromis medzi zložitosťou a presnosťou [7]. V tomto článku sa prezentuje myšlienka návrhu stavebných blokov matematického modelu s dôrazom na tepelný model ako kľúčový prvok digitálneho dvojčata *SLBESS*. Na presné riešenie tepelného správania batérií sa navrhuje použitie metódy konečných prvkov (*FEM* analýza) [8].

Článok sa zameriava na implementáciu tepelného modelu vrátane vnútorných strát spôsobených meničmi, chladením a samotnými batériami. Model zohľadňuje vonkajšie vplyvy, ako je teplota okolia a slnečné žiarenie. V závere článku sa uvádza overenie návrhu pomocou simulácie s využitím reálnych meteorologických údajov.

2 POPIS MATEMATICKÉHO MODELU

Tepelný model kontajnerového batériového úložiska v tejto štúdii používa analytickú metódu výpočtu. Náhradný teplotný diagram je znázornený na obr. 1. [9]. V kapitole sú podrobnejšie opísané jednotlivé komponenty tohto modelu. Matematický model možno rozdeliť na dve hlavné časti. Vnútrná časť tepelného systému zahŕňa všetky vnútorné zariadenia, ako sú batérie, meniče a kovové držiaky. Táto časť akumuluje energiu prostredníctvom svojej mernej tepelnej kapacity, a tým ovplyvňuje zmeny vnútornej teploty zásobníka. Druhou časťou je vonkajší skelet kontajnera, ktorý má vlastnú tepelnú kapacitu. Tento skelet je ovplyvňovaný teplotou okolia kontajnera prostredníctvom tepelnej vodivosti, slnečného žiarenia a atmosférických vplyvov, ako je vietor a jeho rýchlosť. Tieto výkonové faktory budú navonok ovplyvňovať teplotu kontajnera a meniť ju

prostredníctvom jeho mernej tepelnej kapacity. Táto teplota kontajnera zas ovplyvní vnútornú časť, pôsobením tepelného výkonu na jej prostredie. Tento vonkajší vplyv sa zohľadňuje pri analýze vnútornej časti, kde sa ďalej používa na výpočet potrebného chladiaceho výkonu na klimatizáciu vnútorného priestoru kontajnera.



Obr. 1. Náhradná teplotná schéma

2.1 Výpočet vnútornej teploty kontajnera

Výpočet vnútornej teploty kontajnera je pomocou nasledujúcej rovnice (1):

$$T_{intern(k)} = T_{intern(k-1)} + \left(\frac{P_{total} \cdot \Delta t}{m_{case} \cdot c_{intern}} \right), \quad (1)$$

kde Δt je krok simulácie,

m_{case} je hmotnosť skeletu kontajnera,

c_{intern} je vnútorná tepelná kapacita, ktorá závisí od vnútorného zariadenia a je určená ako odhad strednej hodnoty všetkých vnútorných komponentov batériového úložiska. V našom prípade bola vypočítaná hodnota $640 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ za predpokladu, že je vnútorná časť úložiska zložená takto: *Fe* 24 %, *Cu* 5 %, *Al* 1 %, *Li-Ion* 70 %,

P_{total} sú celkové straty a sú definované ako:

$$P_{total} = P_{loss} + P_{cool} + P_{cont}, \quad (2)$$

kde P_{loss} je stratový výkon všetkých vnútorných modulov a je definovaný ako:

$$P_{loss} = \sum P_{ACDCLss} + \sum P_{DCDCLss} + \sum P_{BMSLss} + \sum P_{BatLss} + \sum P_{ClimaLss} + \sum P_{OtLss}, \quad (3)$$

kde $\sum P_{ACDCLss}$ je suma strát *AC/DC* meničov,

$\sum P_{DCDCLss}$ je suma strát *DC/DC* meničov,

$\sum P_{BMSLss}$ je suma strát *BMS*,

$\sum P_{BatLss}$ je suma strát batérií,

$\sum P_{ClimaLss}$ je stratový výkon klimatizácie (vlastné straty, vlastná spotreba),

$\sum P_{OtLss}$ sú ostatné straty (*HMI*, *LAN*, *PC*, *Alarm*, osvetlenie).

P_{cool} je chladiaci výkon klimatizačnej jednotky, ktorá musí byť dimenzovaná tak, aby i pri najväčších stratových výkonoch a najteplejšom počasí a vetru, teda najväčšom ohreve kontajnera zvonku, zvládla udržať vnútornú teplotu na požadovanej úrovni a dokázala regulovať všetky vnútorné prechodové teplotné deje,

P_{cont} je výkonový podiel, ktorý sa prenáša z vonkajšieho prostredia cez tepelný odpor na vnútornú časť kontajnera. Je definovaný podľa rovnice (4):

$$P_{cont} = \frac{(T_{surf} - T_{intern}) \cdot \lambda_{cont} \cdot S_{cont}}{d_{is}}, \quad (4)$$

kde T_{surf} je vonkajšia povrchová teplota,

λ_{cont} je tepelná vodivosť izolácie stien,

S_{cont} je vnútorná plocha povrchu kontajnera,

d_{is} je hrúbka steny kontajnera.

2.2 Výpočet teploty povrchu kontajnera

T_{surf} je ekvivalentná povrchová teplota alebo priemer všetkých miestnych povrchových teplôt. Ak by sme chceli vypočítať miestne teploty každého povrchu zvlášť, museli by sme problém rozdeliť na všetkých šesť rôznych stien a vypočítať každú stenu zvlášť. Náš zjednodušený model predstavuje súčet všetkých teplotných rozdielov medzi všetkými stenami. Výpočet povrchovej teploty je daný rovnicou (5).

$$T_{surf(k)} = T_{surf(k-1)} + \frac{(P_{sun} + P_{wind} + P_{cont} + P_{amb}) \cdot \Delta t}{m_{case} \cdot c_{case}}, \quad (5)$$

kde c_{case} je tepelná kapacita kontajnerovej steny,

m_{case} je hmotnosť skeletu, ktorá je 2300 kg v prípade 20 ft kontajnera a 3750 kg v prípade 40 ft kontajnera.

Výkon vyžiarovaný slnkom je označený ako P_{sun} . P_{sun} závisí od viacerých aspektov, ako je plocha kontajnera, natočenie kontajnera, poloha alebo tienenie okolitými objektami. Výpočet vychádza z normy [10]. Vonkajší vietor ovplyvňuje tepelnú vodivosť kontajnera a je kľúčovým faktorom pri simulácii. Vplyv poveternostných podmienok možno uplatniť rovnakým spôsobom ako v prípade nízkopodlažných budov, s parametrami ako je povrch, drsnosť, vlhkosť, tvar a orientácia voči vetru. Rozdielne účinky vetra môžu nastať napríklad vtedy, ak je časť kontajnera na záveternej strane a časť na náveternej strane. Pre najbežnejší scenár je zahrnutý zjednodušený výpočet, keď je kontajner postavený z polovice na záveternej strane a z polovice na náveternej strane.

P_{wind} je príspevok výkonu z vetra a jeho výpočet je daný rovnicou (6). Tu nie je daná len rýchlosť vetra, ale pri výpočte celkového výkonu zohrávajú dôležitú úlohu aj ďalšie aspekty, ako je smer vetra a vlhkosť.

Používame metodiku inšpirovanú štandardnými výpočtovými technikami používanými v praxi pri simulácii nízkopodlažných budov, ktorá je k dispozícii v [10]. Uvedené javy sa teda odrážajú prostredníctvom tzv. premennej tepelnej vodivosti h_c ako:

$$P_{wind} = h_c \cdot S_{cont} \cdot (T_{surf} - T_{ambient}), \quad (6)$$

$$h_c = 1,21 \cdot V_s + 3,35, \quad (7)$$

kde V_s je rýchlosť vetra v 10 m výške,

T_{amb} je teplota vzduchu.

Teplotný spád $T_{amb} - T_{surf}$ chladí, alebo ohrieva vnútorný objem kontajneru výkonom P_{amb} :

$$P_{amb} = S_{cont} \cdot (T_{surf} - T_{amb}) \cdot U_{ext}, \quad (8)$$

kde U_{ext} je vonkajší tepelný odpor ($0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}$) [11].

3 SIMULAČNÁ ŠTÚDIA

Na overenie navrhnutého matematického modelu bola navrhnutá simulácia. Na simuláciu sa použili reálne meteorologické údaje z konkrétnej lokality GPS a vygenerovali sa tzv. "typické experimentálne dáta" (smer vetra, intenzita slnečného žiarenia atď.). Simulácia bola implementovaná v jazyku Python a pre tento článok sme vybrali prípad s parametrami uvedenými v tab. 1. Lokalita kontajnera sa nachádza v horských podmienkach. Riadenie SLBESS je zamerané na optimalizáciu zisku zo skladovania lacnej energie (napr. zo Slnka) a jej poskytovania v čase dopytu.

Tab. 1. Parametre simulácie

| | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| Rozmery kontajnera | 20 ft; 2,6 x 2,4 x 6 m |
| Izolácia steny | 100 mm $\lambda_{isol} = 0,045$ |
| Nominálny výkon AC meniča | 150 kW |
| Nominálny výkon DC meniča | 10 x 50 kW |
| Chladiaci výkon klimatizácie | 20 kW |
| Kapacita batérií | 312 kWh |
| Hmotnosť skeletu kontajnera | 2,3 t |
| Celková hmotnosť | 8,3 t |

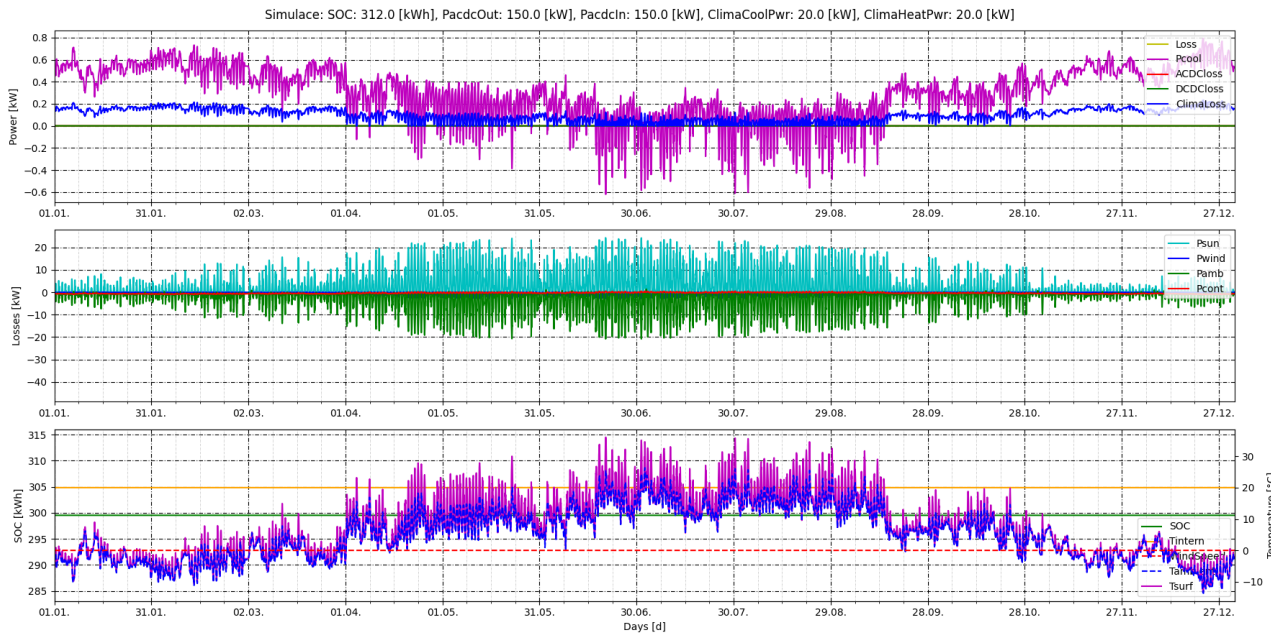
3.1 Beh naprázdno

Hlavným účelom tejto teplotnej simulácie je určiť veľkosť chladiaceho výkonu. Cieľom simulácie nie je poznať presné bodové teploty najviac exponovaných častí povrchu zásobníka. Prevádzka v stave nečinnosti znamená, že kontajner pracuje bez napájania, jeho rozptyl energie predstavuje len vlastnú spotrebu klimatizačné zariadenia. Klimatizačné zariadenie udržiava teplotu v interiéri na 20°C. Počiatočné podmienky sú všetky vnútorné teploty a vonkajšia

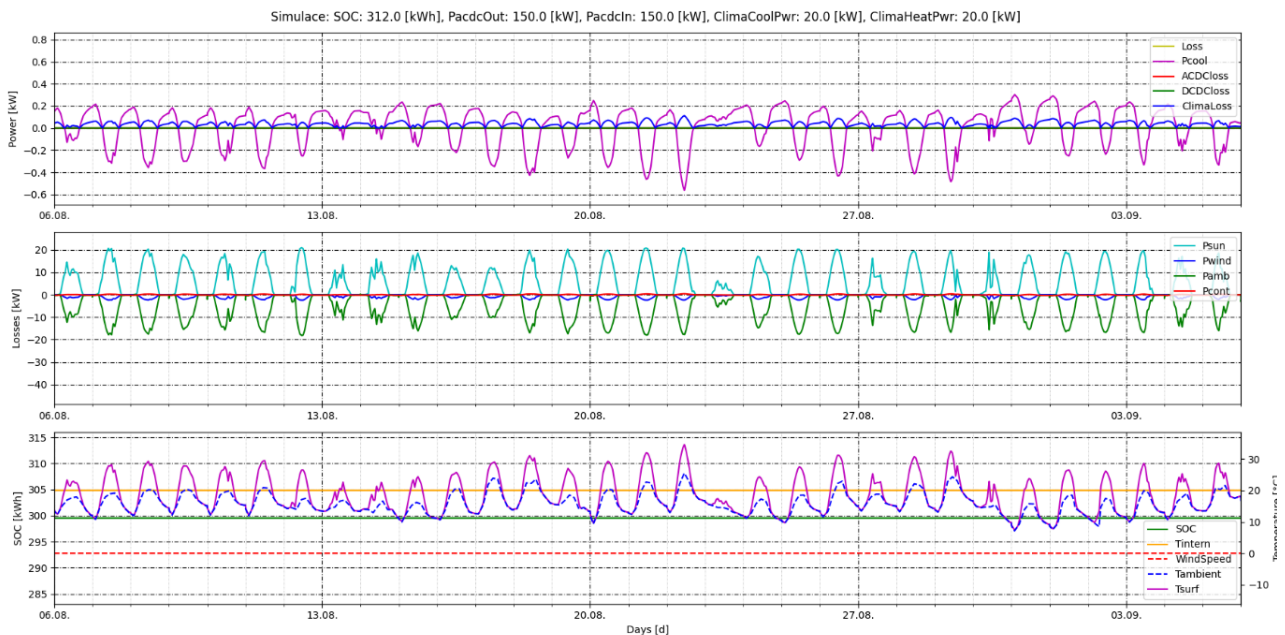
teplota 20°C. Výsledkom simulácie je zistenie množstva chladiacej energie vo vnútri kontajnera.

Na obr. 2 je znázornený výstupný graf simulácie chodu naprázdno počas jedného roka. Opis

Kladná hodnota predstavuje ohrev a záporná hodnota predstavuje chladenie. Fialová čiara na tretej strane grafe predstavuje povrchovú teplotu T_{surf} a modrá čiara teplotu okolí T_{amb} . Výsledná spotreba sa



Obr. 2. Výsledky simulácie pre „Typický rok - naprázdno“. Horný: žltá - P_{loss} , fialová - P_{cool} , červená - $P_{AC-DC_{loss}}$, zelená - $P_{DC-DC_{loss}}$; stred: sv. zelená - P_{sun} , modrá - P_{wind} , zelená - P_{amb} , zelená - P_{cont} ; dole: zelená - Stav batérie, fialová - P_{cool} , oranžová - T_{intern} , červená bodkovaná - rýchlosť vetra, modrá - T_{amb} , fialová čiarkovaná - T_{surf}



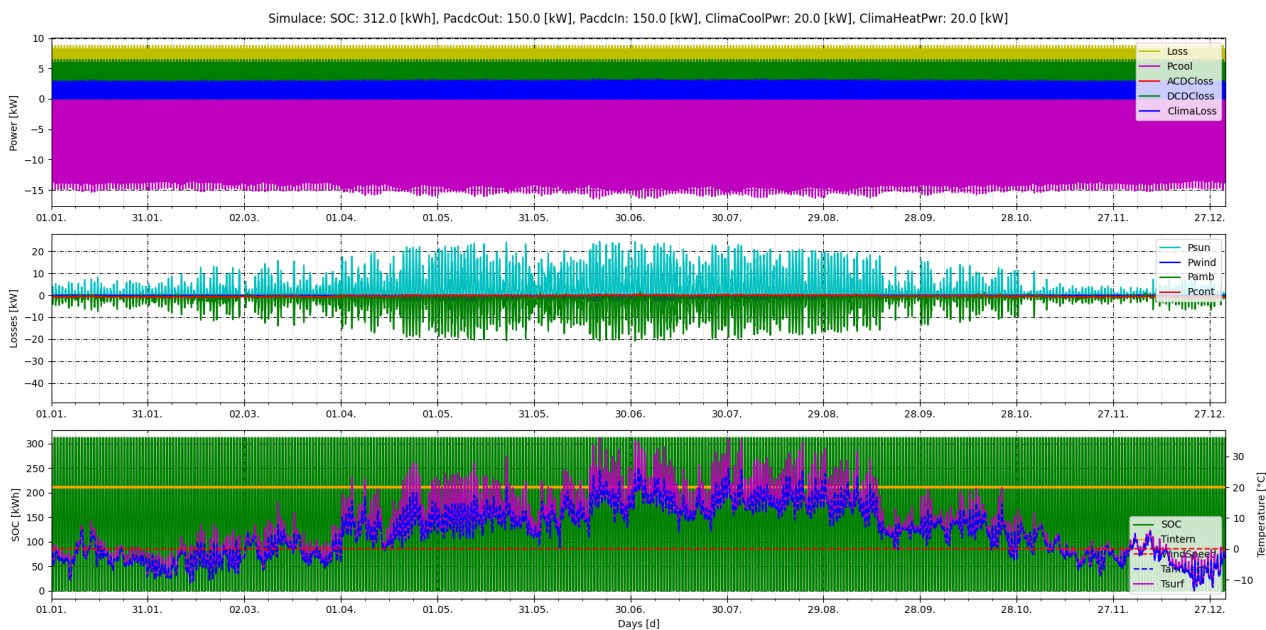
Obr. 3. Výsledky simulácie pre „letný mesiac - naprázdno“. Hore: žltá - P_{loss} , fialová - P_{cool} , červená - $P_{AC-DC_{loss}}$, zelená - $P_{DC-DC_{loss}}$; stred: sv. zelená - P_{sun} , modrá - P_{wind} , zelená - P_{amb} , zelená - P_{cont} ; dole: zelená - Stav batérie, fialová - P_{cool} , oranžová - T_{intern} , červená bodkovaná - rýchlosť vetra, modrá - T_{amb} , fialová čiarkovaná - T_{surf}

jednotlivých častí je uvedený pod obrázkom. Podrobný pohľad na jeden kalendárny letný mesiac je znázornený na obr. 3. Zaujímavá je fialová čiara na prvom grafe. Tu vidíme chladiaci výkon P_{cool} klimatizácie.

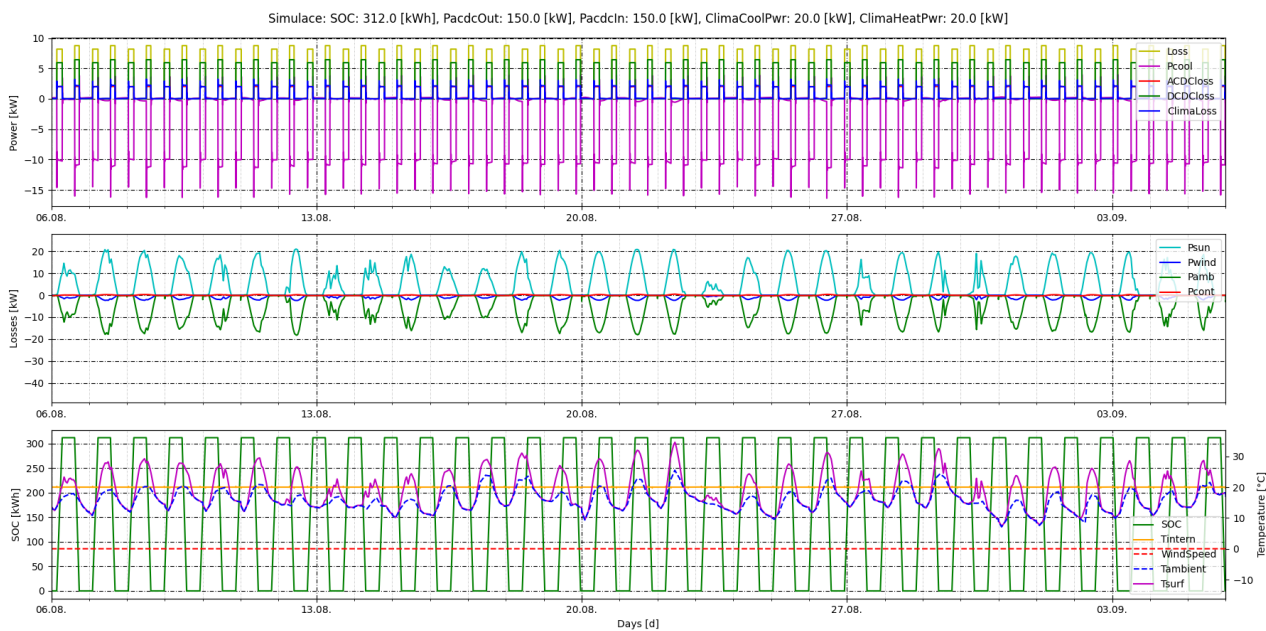
vypočítala integráciou metódou najmenších štvorcov. Výsledná vlastná spotreba klimatizácie bola

865,72 kWh. Klimatizácia vyrobila 2,82 MWh tepla a 166,8 kWh chladu.

sa opäť nabije z 0 % na 100 %, v oboch prípadoch s výkonom 100 kW. Jeho vnútorný rozptyl energie je v



Obr. 4. Výsledky simulácie pre „Typický rok - jeden cyklus denne.“ Hore: žltá - P_{loss} , fialová - P_{cool} , červená - P_{AC-DC_loss} , zelená - P_{DC-DC_loss} ; stred: sv. zelená - P_{sun} , modrá - P_{wind} , zelená - P_{amb} , zelená - P_{cont} ; dole: zelená - stav batérie, fialová - P_{cool} , oranžová - T_{intern} , červená_bodkovaná - rýchlosť vetra, modrá - T_{amb} , fialová_čiarkovaná - T_{surf}



Obr. 5. Výsledky simulácie pre „letný mesiac - jeden cyklus denne.“ Hore: žltá - P_{loss} , fialová - P_{cool} , červená - P_{AC-DC_loss} , zelená - P_{DC-DC_loss} ; stred: sv. zelená - P_{sun} , modrá - P_{wind} , zelená - P_{amb} , zelená - P_{cont} ; dole: zelená - stav batérie, fialová - P_{cool} , oranžová - T_{intern} , červená_bodkovaná - rýchlosť vetra, modrá - T_{amb} , fialová_čiarkovaná - T_{surf}

3.2 Jeden cyklus denne

Druhý simulovaný problém je za podmienky, že zásobník pracuje denne s jedným cyklom nabíjania a vybíjania. Cyklus je načasovaný tak, že každý deň o 6:00 hod. sa vybije zo 100 % na 0 % a o 18:00 hod.

danom aktívnom čase teplotne kompenzovaný klimatizačnou jednotkou, tak aby sa udržala vnútorná teplota na 20°C. Na obr. 4 je znázornený prehľad za celý rok. Výsledkom simulácie je, že na udržanie konštantnej teploty počas jedného roka pri jednom cykle za deň je skutočná spotreba klimatizácie 5,6 MWh. Klimatizácia vyprodukovala 2,1 MWh na

vykurovanie a 24,94 MWh na chladenie. Špičkový výkon klimatizácie bol 16,45 kW. Celkové straty z výkonových meničov dosiahli 26,8 MWh.

ZÁVER

V tomto článku boli predstavené výhody využitia vyradených batériových článkov z elektrických vozidiel. Medzi výhody patrí nižšia obstarávacia cena a nižší vplyv na životné prostredie. V kombinácii s použitím digitálneho dvojčata možno simulovať rôzne prevádzkové podmienky a na základe výsledkov predpovedať ziskovosť prevádzky.

Okrem toho bol opísaný a vysvetlený tepelný model a schéma výmeny. Tepelný model bol implementovaný v jazyku *Python* a výsledky simulácie dvoch stavov boli uvedené v tretej kapitole. V prvej simulácii sa skúma stav nečinnosti alebo vplyv okolitého prostredia na vlastnú spotrebu. Situácia je modelovaná udržiavaním klimatizácie pri konštantnej teplote 20°C. Výsledná celková vlastná spotreba klimatizácie bola vypočítaná na 865,72 kWh. Z toho klimatizácia vyprodukovala 2,82 MWh tepla a 166,8 kWh vychladila. Druhá simulácia sa týkala podmienky jedného cyklu za deň. Skutočná spotreba bola 5,6 MWh, pričom 24,94 MWh pripadlo na chladenie a 2,1 MWh na vykurovanie.

Zaujímavé je porovnanie pomeru výkonu chladenia a vykurovania v podmienkach prevádzky naprázdno a s jedným cyklom za deň. Je tu badateľný vplyv tepelných strát z prevádzky úložiska. Ďalšia analýza sa zameriava na závislosť od nadmorskej výšky umiestnenia kontajneru, pričom uvedené simulácie sa uskutočnili vo výške 752 m n. m. Vzhľadom na obmedzený rozsah článku nebola uvedená možnosť umiestnenia vo výške 120 m nad morom. Z porovnania vyplýva, že pre vyššie nadmorské výšky sa požiadavka zvyšuje na vykurovanie pri prevádzke na naprázdno.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Úložiská energie z batérií druhej životnosti / Second-life battery storage systems, ITMS2014+: 313012BNG4, 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] COMELLO, S. - REICHELSTEIN, S. (2019): *The emergence of cost-effective battery storage*. In: Nature communications, vol. 10, no. 1, p. 2038.
- [2] GILBERT ZEQUERA, R. - RASSOLKIN, A. - VAIMANN, T. - KALLASTE, A. (2023): *Overview of battery energy storage systems readiness for digital twin of electric vehicles*. In: IET Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 5–16.
- [3] SEMERARO, C. - OLABI, A. - ALJAGHOUB, H. - ALAMI, A. H. - AL RADI, M. - DASSIST, M. - ABDELKAREEM, M. A. (2023): *Digital twin application in energy storage: Trends and challenges*. In: Journal of Energy Storage, vol. 58, p. 106347.
- [4] VANDAMA, A. GARG - PANIGRAHI, B. K. (2021): *Multi-dimensional digital twin of energy storage system for electric vehicles: a brief review*. In: Energy Storage, vol. 3, no. 6, p. e242.
- [5] SLEITI, A. K. - KAPAT, J. S. - VESELY, L (2022): *Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems*. In: Energy Reports, vol. 8, pp. 3704–3726.
- [6] PARK, H.-A. - BYEON, G. - SON, W. - JO, H.-C. - KIM, J. - KIM, S. (2020): *Digital twin for operation of microgrid: Optimal scheduling in virtual space of digital twin*. In: Energies, vol. 13, no. 20, p. 5504.
- [7] BOSCHERT, S. - ROSEN, R. (2016): *Digital twin - the simulation aspect*. In: Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers, pp. 59–74.
- [8] YEOW, K. - TENG, H. - THELLIEZ, M. - TAN, E. (2012): *Thermal analysis of a li-ion battery system with indirect liquid cooling using finite element analysis approach*. In: SAE International Journal of Alternative Powertrains, vol. 1, no. 1, pp. 65–78.
- [9] GATTA, F. - GERI, A. - LAURIA, S. - MACCIONI, M. - PALONE, F. (2015): *Battery energy storage efficiency calculation including auxiliary losses: Technology comparison and operating strategies*. In: IEEE Eindhoven PowerTech, pp. 1–6.
- [10] LIU, Y. - HARRIS, D. (2013): *Measurements of wind speed and convective coefficient on the external surface of a low-rise building*. In: International Journal of Ambient Energy, vol. 36, pp. 1–10, 12.
- [11] ARANI, A. K. - GHAREHPETIAN, G. - ABEDI, M. (2019): *Review on energy storage systems control methods in microgrids*. In: International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 107, pp. 745–757.

Odvođenje matematického modelu hnacieho mechanizmu pre pohon prídavných zariadení dopravného prostriedku

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2560

Vadym Ishchuk, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2563

Alyona Lovska, prof. Ing., Dr.Sc. Tech.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina.
E-mail: alyona.lovska@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2660

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.blatnický@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2659

Denis Molnár, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina.
E-mail: denis.molnar@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2659

Derivation of a mathematical model of a drive mechanism for the drive of additional devices of a transport means

Abstract: The article is focused on a derivation of a mathematical model of a drive mechanism of for a drive of an additional devices of a transport mean. Additional devices are inseparable part of lorries, buses as well as railway vehicles, such as locomotives with independent traction. These additional devices serve for drive of compressors or other similar devices. The mathematical model is derived by means of the *Lagrange's equations of the second kind method*. After finding the energies, *the method of the reduction of mass and force quantities* to the chosen part. In this case, it is reduced to the drive shaft of the considered mechanism. The presented mechanism is described by means of one equation of motion. This equation can be solved by means of the *Matlab* software. The last part of the article additional includes illustrations of the solved mechanism created in the *Simpack* multibody software, which can be analysed and the results can be compared with the results obtained from the *Matlab* software.

Keywords: mathematical model, *Matlab* software, *Simpack* software, equation of motion, drive mechanism, transport mean.

ÚVOD

Prídavné zariadenia dopravných prostriedkov sú v súčasnosti ich neoddeliteľnou súčasťou. Bez týchto

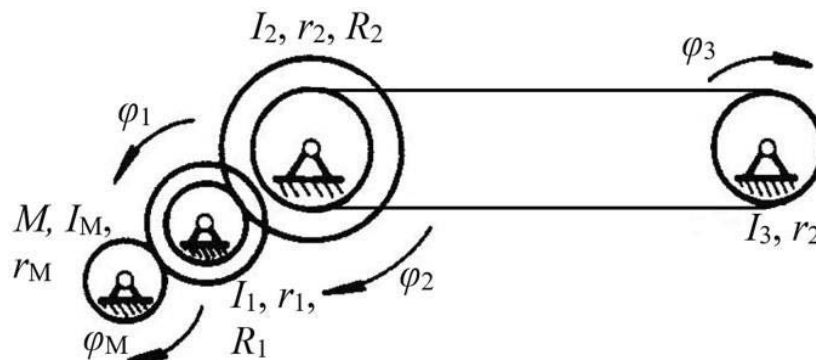
zariadení už nie je možné, aby spoľahlivo pracovali rôzne druhy dopravných prostriedkov. Prídavné zariadenia môžu byť použité na rôznu činnosť. Ak ide o nákladné automobily [1], autobusy alebo

koľajové vozidlá s nezávislou trakciou prípadne aj závislou trakciou [2-5], spaľovací motor, prípadne aj elektromotor poháňa pomocou mechanického pohonu kompresor ako zdroja stlačeného vzduchu. Existujú aj ďalšie typy prídavných zariadení, ktoré potrebujú pre pohon aj zdroj, ako je motor a od neho je hnané toto zariadenie.

Cieľom tohto príspevku je predstavenie odvodenia matematického modelu hnacieho mechanizmu pre pohon prídavných zariadení dopravného prostriedku [6, 7]. Takýto matematický model je možné použiť pre vyšetovanie dynamických javov súvisiacich s pracovnou činnosťou prídavného zariadenia. Matematický model je zostavený pomocou metódy *Lagrangeových rovníc druhého druhu*. Následne bola aplikovaná *metóda redukcie hmotnostných a silových veličín*. Sústava je redukovaná na hnací hriadeľ pohonného mechanizmu. Takýto model je možné riešiť v programe *Matlab* a vyšetovať dynamické vlastnosti. V ďalšej časti je ešte doplnený aj model viazanej mechanickej sústavy (angl. *multibody system*) hnacieho mechanizmu pre pohon vytvorený v programe *Simpack*.

1 POSTUP ODVODENIA MATEMATICKÉHO MODELU

Postup odvodenia matematického modelu hnacieho mechanizmu pre pohon prídavných zariadení dopravného prostriedku je založený na uvažovaní vhodného dynamického modelu. Dynamický model, t. j. výpočtová schéma, je zobrazený na obr. 1 [8].



Obr. 1. Dynamický model (výpočtová schéma) uvažovaného hnacieho mechanizmu

Úlohou je odvodiť matematický model hnacej sústavy, ktorá je zobrazená na obr. 1. Vidíme, že táto hnacia sústava sa skladá so štyroch kolies, ktoré sú označené M , 1, 2 a 3. Súčasťou hnacej sústavy je remeň. Kolesá M , 1 a 2 sú ozubené kolesá.

Geometria kolesa 2 je prispôbená tak, aby časť kolesa bola hnaná od kolesa 1 a na druhej jeho časti bol napojený hnací remeň, ktorý potom poháňa koleso 3.

Matematický model bude zostavený pomocou *metódy redukcie hmotnostných a silových veličín*,

pričom sa vychádza z *metódy Lagrangeových rovníc druhého druhu*. Ich všeobecný tvar je [9]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_P}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

kde E_K - kinetická energia sústavy,

E_D - disipatívna energia sústavy,

E_P - potenciálna energia sústavy,

\dot{q}_i, q_i - zovšeobecnená rýchlosť, resp.

zovšeobecnená súradnica sústavy,

Q_i - vonkajšie zaťaženie sústavy,

i - počet stupňov voľnosti sústavy.

Vo všeobecnom tvare je kinetická energia sústavy daná vzťahom:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot I_i \cdot \dot{\varphi}_i^2, \quad (2)$$

kde I_i - hmotné momenty zotrvačnosti jednotlivých komponentov sústavy,

$\dot{\varphi}_i$ - uhlové rýchlosti týchto komponentov,

pričom φ je zovšeobecnená súradnica sústavy.

Keďže v sústave sú uvažované iba tuhé telesá a sústava nemení svoju výškovú polohu, potenciálna energia sústavy je rovná nule:

$$E_P = 0. \quad (3)$$

Ďalej v sústave nie je uvažovaný ani tlmiaci člen a ani trenie. Teda ide o konzervatívnu sústavu, v ktorej disipatívna energia je tiež rovná nule:

$$E_D = 0. \quad (4)$$

Za zovšeobecnenú súradnicu zvolíme uhlovú výchylku φ_M hnacieho hriadeľa M .

Pri preskúmaní dynamickej sústavy vidíme, že kinetická energia sústavy je vo všeobecnom tvare:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot I_M \cdot \dot{\varphi}_M^2 + \frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot I_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2} \cdot I_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2, \quad (5)$$

kde I_M, I_1, I_2, I_3 - hmotné momenty zotrvačnosti kolies $M, 1, 2$ a 3 ,

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - uhlové výchylky jednotlivých kolies hnacieho mechanizmu (obr. 1).

Keďže má riešený mechanizmus iba jeden stupeň voľnosti, ktorý je vyjadrený zovšeobecnenou súradnicou φ_M , je nevyhnutné aj ostatné súradnice ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$) vyjadriť pomocou tejto zovšeobecnenej súradnici. To vykonáme pomocou uvažovania prevodových pomerov v hnacom mechanizme.

Prevodový pomer i_{M1} medzi kolesami M a 1 bude:

$$i_{M1} = \frac{D_1}{d_M} = \frac{n_M}{n_1}. \quad (6)$$

Po dosadení parametrov dostaneme:

$$i_{M1} = \frac{2 \cdot R_1}{2 \cdot r_M} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_M}{2 \cdot \pi \cdot \omega_1} \quad (7)$$

kde r_M, R_1 - polomery kolies mechanizmu podľa obr. 1,

ω_M, ω_1 - uhlové rýchlosti otáčania kolies M a 1.

Po dosadení dostaneme vzťah pre φ_1 :

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{r_M}{R_1} \cdot \dot{\varphi}_M \Rightarrow \varphi_1 = \frac{r_M}{R_1} \cdot \varphi_M. \quad (8)$$

Prevodový pomer i_{12} medzi kolesami 1 a 2 je:

$$i_{12} = \frac{R_2}{r_1} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2}, \quad (9)$$

potom pri uvažovaní vzťahu (8) dostaneme:

$$\varphi_2 = \frac{r_1}{R_2} \cdot \varphi_1 \Rightarrow \varphi_2 = \frac{r_1}{R_2} \cdot \frac{r_M}{R_1} \cdot \varphi_M, \quad (10)$$

kde r_1, R_2 sú polomery kolies mechanizmu podľa obr. 1.

Prevodový pomer i_{23} medzi kolesami 2 a 3 je:

$$i_{23} = \frac{r_2}{r_3} = \frac{\varphi_2}{\varphi_3}, \quad (11)$$

potom pri uvážení vzťahu (8):

$$\varphi_3 = \varphi_2 \Rightarrow \varphi_3 = \frac{r_1}{R_2} \cdot \frac{r_M}{R_1} \cdot \varphi_M. \quad (12)$$

kde r_1, R_2 sú polomery kolies mechanizmu podľa obr. 1.

Konečný tvar kinetickej energie potom bude:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot I_M \cdot \dot{\varphi}_M^2 + \frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot \left(\frac{r_M}{R_1} \cdot \dot{\varphi}_M \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot I_2 \cdot \left(\frac{r_1}{R_2} \cdot \frac{r_M}{R_1} \cdot \dot{\varphi}_M \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot I_3 \cdot \left(\frac{r_1}{R_2} \cdot \frac{r_M}{R_1} \cdot \dot{\varphi}_M \right)^2 \quad (13)$$

Teraz je možné vykonať derivácie energie podľa zovšeobecnenej súradnice φ_M , resp. podľa zovšeobecnenej rýchlosti $\dot{\varphi}_M$.

Výsledná pohybová rovnica hnacieho mechanizmu podľa obr. 1 je:

$$\left[I_M + I_1 \cdot \frac{r_M^2}{R_1^2} + (I_2 + I_3) \cdot \frac{r_1^2}{R_2^2} \cdot \frac{r_M^2}{R_1^2} \right] \cdot \ddot{\varphi}_M = M, \quad (14)$$

resp. v stručnej forme bude mať pohybová rovnica tvar:

$$I_{red} \cdot \ddot{\varphi}_M = M, \quad (15)$$

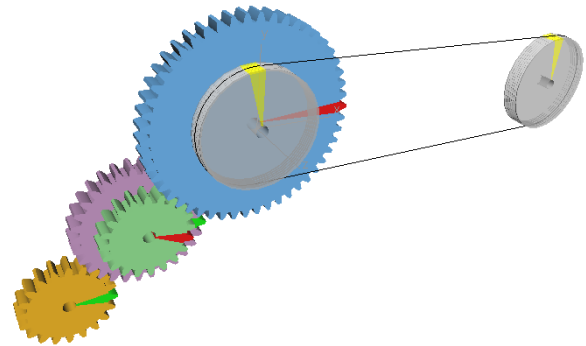
kde I_{red_M} - hmotný moment mechanizmu redukovaný na koleso M (obr. 1),

M - hnací moment pôsobiaci na koleso M (obr. 1).

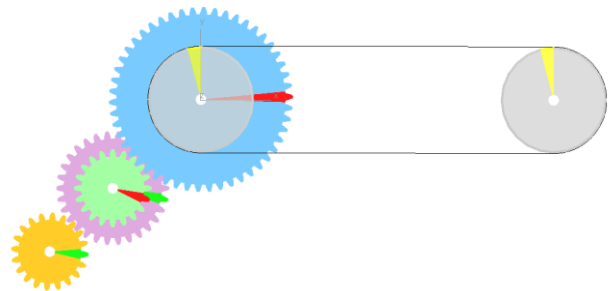
Vytvorený matematický model, teda pohybová rovnica, sa môže riešiť pomocou programu *Matlab*, *MathCad* alebo iným, ktorý umožňuje výpočet diferenciálnej rovnice. Pomocou nej potom môžeme skúmať dynamické vlastnosti hnacieho mechanizmu.

2 MBS MODEL RIEŠENÉHO HNACIEHO MECHANIZMU

Ako ďalší krok tejto práce bol vytvorený virtuálny model riešeného hnacieho mechanizmu pre pohon prídavných zariadení dopravného prostriedku. Ide o model viazanej mechanickej sústavy (*multibody model*), ktorý bol vytvorený v prostredí programu *Simpack*. Model je zobrazený na obr. 2 a obr. 3.



Obr. 2. Priestorový 3D MBS model hnacieho mechanizmu v programe *Simpack*



Obr. 3. MBS model hnacieho mechanizmu - nárys

Tento model pozostáva zo štyroch tuhých telies, ktoré reprezentujú ozubené kolesá prevodu a ktoré sú označené ako $M, 1, 2$ a 3 (obr. 1). Tieto kolesá boli

vytvorené v programe ako tuhé telesá. Tieto telesá sú v programe označené ako *Bodies*. Pre potreby simulačného modelu majú definovaný hmotný moment zotrvačnosti kolo osi rotácie.

Prevodový pomer i je predpísaný priamo v programe prostredníctvom na to určeného špecializovaného modelovacieho prvku.

Ďalej, tieto kolesá (telesá) majú definovaný stupeň voľnosti pomocou mechanických rotačných väzieb, ktoré im umožňujú konať predpísaný rotačný pohyb. Tieto modelovacie prvky sa v programe *Simpack* nazývajú *Joint*.

Na hnacie koleso potom pomocou modelovacieho prvku *Force Element* pôsobí hnací moment M . Moment je definovaný ako časová funkcia a používateľ môže jednoduchým spôsobom zmeniť smer otáčania sústavy, ako aj parametre hnacieho momentu.

Model pásu, resp. remeňa, ktorý tvorí väzbu medzi kolesom 2 a 3, boli vytvorené priamo pomocou modelovacieho prvku *Belt*. V tomto modelovacom prvku je možné vybrať druh remeňa, ktorý je vhodný pre riešenie sústavy.

Takto vytvorené modely budú ďalej skúmané z hľadiska ich dynamických vlastností. Budú sa porovnávať výsledky z programu *Matlab* a *Simpack*, čo umožní verifikáciu dosiahnutých výsledkov a overenie správnosti postupu pri tvorbe a odvodení matematického modelu.

ZÁVER

Cieľom predkladaného príspevku bolo predstavenie postupu odvodenia matematického modelu hnacieho mechanizmu pre pohon prídavných zariadení dopravného prostriedku. Takéto prídavné zariadenie môže byť napríklad kompresor alebo čerpadlo ako zdroj stlačeného vzduchu, resp. tlakovej kvapaliny. Matematický model bol odôvodnený *metódou Lagrangeových rovníc druhého druhu* a následne bola aplikovaná *metóda redukcie hmotnostných a silových veličín*. To viedlo k výslednej pohybovej rovnici druhého rádu s konštantnými koeficientami s pravou stranou. Táto rovnica môže byť riešená v programe *Matlab*. Výstupom budú grafy výstupných veličín z hľadiska dynamického správania sa tejto sústavy. Obsah príspevku je doplnený o tvorbu *MBS* modelu riešenej hnacej sústavy v programe *Simpack*. Po zadaní vstupných parametrov do modelu je potom možné získať grafické priebehy výstupných veličín, ktoré sa zobrazia v module *Simpack PostProcessor*.

Pod'akovanie

„Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V01-00131.“

Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného program Vozidlá a motory.

LITERATÚRA

- [1] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - MELNIK, R. - KRAVCHENKO, O. (2022): *A mathematical model of operation of a semi-trailer tractor powertrain*. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina, Vol. 24, No. 3, pp. B267-B274, ISSN 1335-4205.
- [2] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - ISHCHUK, V. - MOLNÁR, D. (2023): *Derivation of a simplified mathematical model of a DMU'S powertrain*. In: Súčasné problémy v koľajových vozidlách, zborník prednášok, , pp. 101-108, ISBN 978-80-89276-61-5.
- [3] GUOSONG, W. - LONGJIANG, S. - YUAN, Y. - WENSHENG, S. - JINGCHUN, H. (2023): *Determination of the dynamic characteristics of locomotive drive systems under re-adhesion conditions using wheel slip controller*. In: Journal of Zhejiang University: Science A, Vol. 24, No. 8, pp. 722-734, ISSN 1673-565X.
- [4] VISHAL, P. - AMANDEEP, G. - CHINMAY, M. - MANJEET, S. (2023): *Simulation and Analysis of Electric Vehicle System*. In: 3rd IEEE International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, SeFet, Bhubaneswar, 9-12 August, ISBN 979-835031997-2.
- [5] AMMAR MISHAL ABD-ELRASOOL ELAGAB - IBRAHIM EL-AMIN (2022): *The Impact of Electrical Traction Drives on Power System Quality under Different Loading Conditions*. In: Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 47, No. 11, pp. 14695-14710, ISSN 2193-567X.
- [6] GABBERT, U. - DUVIGNEAU, F. - RINGWELSKI, S. (2017): *Noise control of vehicle drive systems*. In: Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 183-200, ISSN 0354-2025.
- [7] DIŽO, J. - BLATNICKÝ, M. - ISHCHUK, V. - KOZÁKOVÁ, K. - SEMENOV, S. - MIKHAILOV, E. (2023): *A mathematical model of the diesel-mechanical power transmission of a railway vehicle*. In: Transport means: Sustainability: research and solutions: proceedings, 1. vyd., Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, pp. 237-243, ISSN 1822-296X.
- [8] BRÁT, V. - STEJSKAL, V. - VOTÍPKA, F. (1980): *Základy dynamiky strojů a konstrukcií*. Praha: Vydavatelství ČVUT.
- [9] FILO, V. - LUKÁČ, M. (2005): *Modelovanie a simulácia mechanizmov s počítačovou podporou*. Žilinská univerzita v Žiline, 216 s, ISBN 80-8070-466-X.

Magazin TECHNOLOG

Publiziert werden wissenschaftliche, fachliche und Forschungsbeiträge, theoretische Abhandlungen, Anleitungen, Studien, Rezensionen, Informationen über die Bearbeitung der technischen Materialien. Der Fokus liegt auf Beiträgen und Arbeiten, die sich mit den Fragen aus dem Gebiet der Span- und Spanlosen Technologien, der physikalischen Prinzipien der unkonventionellen Technologien, der technologischen Konstruktion der Werkzeuge, der wirtschaftlichen Seite des Herstellungsprozesses, der Ökologie, so wie der Abfallverwertung befassen. Genauso werden Beiträge über Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen und Messtechnik für den Bereich der mechanischen Technologien, Untersuchungsergebnisse über die Informationstechnologie im technologischen Bereich publiziert. Des weiterem werden Beiträge über die Geschichte und die Entwicklung der mechanischen Technologie veröffentlicht. Das Magazin TECHNOLOG publiziert Beiträge in folgenden Sprachen: Slowakisch, Tschechisch, Polnisch, Russisch, Englisch und Deutsch.

Alle Beiträge sind rezensiert und die Redaktion behält sich den Anspruch auf ihre Bearbeitung durch sie vor. Die Redaktion übernimmt keine Verantwortung für mögliche Schäden, die durch die Anwendung der Tätigkeiten, Methoden, Produkte, Ideen, Anleitungen etc. publiziert durch die Autoren der Beiträge verursacht werden.

Evidenznummer MK SR-2800/08.

ISSN 1337-8996

Adresse der Redaktion: Universität Žilina, Fakultät Maschinenbau, Univerzitná 1, 01026 Žilina

Telefon: +421 (0) 41-513 2764, 513 2814,

Fax: +421 (0) 41-513 1535

Email: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

Журнал ТЕХНОЛОГ

Печатает научные, исследовательские, профессиональные, теоретические работы, инструкции, аналитические обзоры, рецензии, информации о переработке технических материалов. Направлен на печатание работ посвященных вопросам в области технологий обработки со стружкой и без, физикальных принципов нестандартных технологий, технологичности конструкции инструментов, экономики производственного процесса, экологизации, переработке отходов. Также публикует работы о машинах, инструментах, препаратах и измерительной технике для области механических технологий, результатов научных исследований в сфере информационных технологий в технологической области. Публикует статьи по истории и эволюции механических технологий. Журнал публикует статьи на языках: словацком, чешском, польском, русском, английском и немецком.

Все статьи рецензируются и редакция оставляет за собой право их редакционного корректирования. Редакция не несет никакой ответственности за возможные повреждения вызванные использованием операций, методов, продуктов, идей, инструкций и т.д. в опубликованных авторами статьях.

Регистрационный номер MK SR 2800 - /08.

ISSN 1337 – 8996

Адрес редакции: Žilinská univerzita, strojnická fakulta, Univerzitná 1, 01026 Žilina

Telefón: 041-513 2764, 513 2814

Fax: 041-513 1535

e-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk

ISSN 1337-8996

DOI: <https://doi.org/10.26552/tech.J.2023.5>