

---

# 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

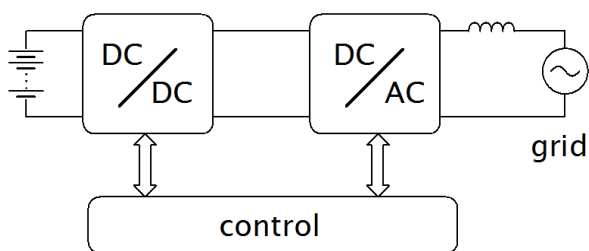
v rozvodnej sieti a podobne. Tento článok sa zaoberá predstavením návrhu *DC/DC* meniča pre aplikáciu v *SLBESS*.

## 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.

Všeobecne 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.



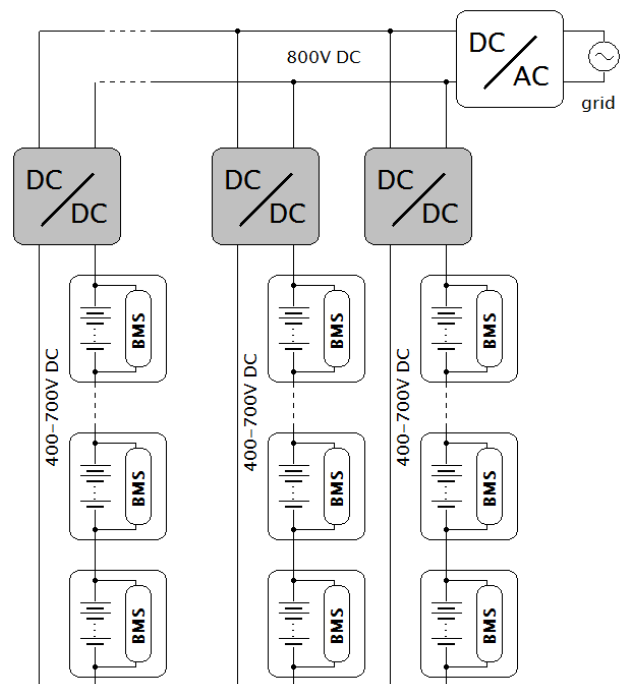
Obr. 1. Všeobecná blokovo schéma *SLBESS*

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.

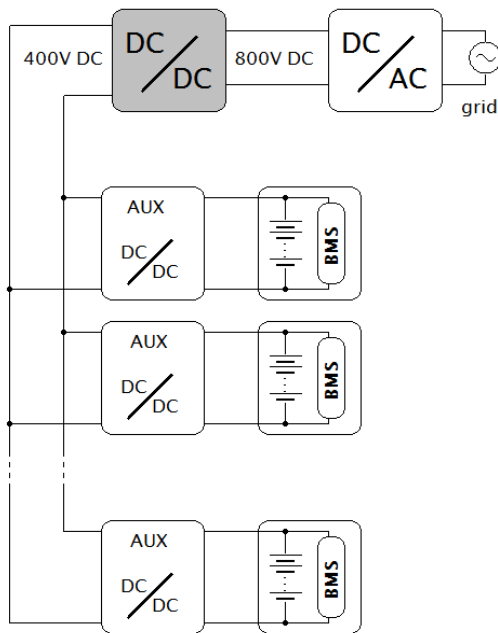
Každý batériový blok má vlastný BMS (*Battery Management System*). Ten sa stará o monitorovanie a balansovanie jednotlivých článkov v batérii. Stráži ich teplotu, stav nabitia a pod.

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

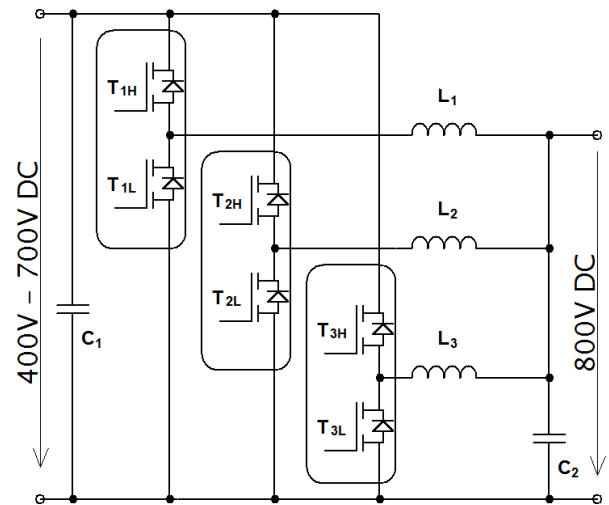
Ako už bolo spomenuté vyššie, zaoberá sa tento článok návrhom DC/DC meniča pre SLBESS aplikácie. V predchádzajúcich obrázkoch je tento menič označený šedivou farbou (obr. 2 a obr. 3) Aby bol navrhovaný menič variabilný, musí svojimi parametrami vyhovovať obom vyššie spomenutým variantom zapojenia SLBESS.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

- rozsah vstupného napätia  $400\text{ V} \div 700\text{ V DC}$ ,
- menovité výstupné napätie  $800\text{ V DC}$ ,
- maximálny výstupný výkon  $30\text{ kW}$ ,
- 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 ( $400\text{ V} \div 700\text{ V}$ ) ako požadované výstupné napätie ( $800\text{ V}$ ). 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 ( $30\text{ kW}$ ). 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.

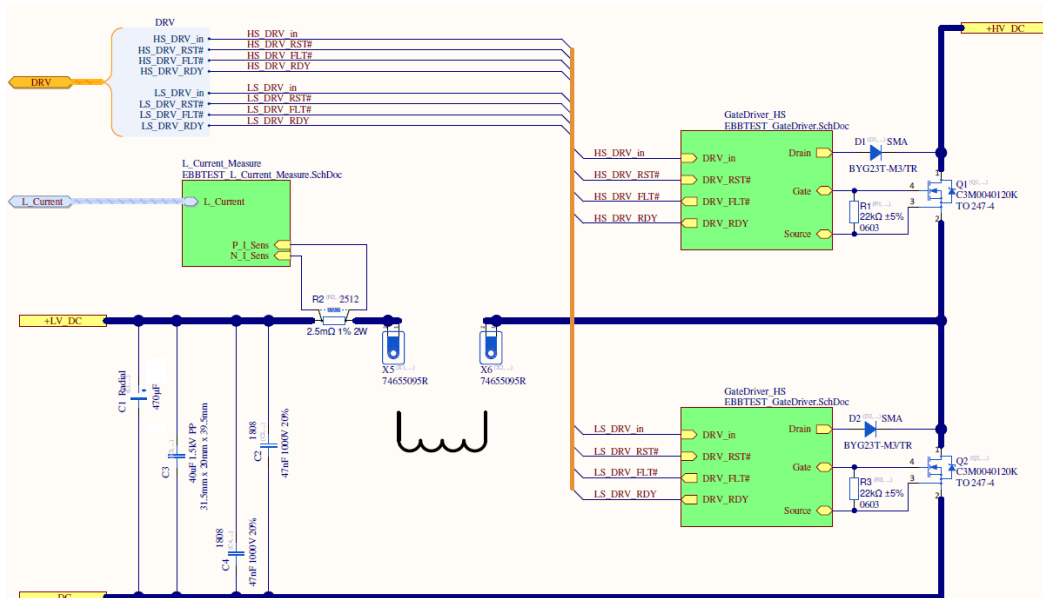


Obr. 4. Trojfázový pol-mostík s prekladaním pracovných cyklov

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  $30 \text{ kW}$ .

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  $1198 \text{ mm}^2$ . Uprostred jadra je vytvorená vzduchová medzera. Vinutie tlmivky tvorí 32 závitov navinutých vysokofrekvenčným lankom s efektívnym prierezom cca  $15 \text{ mm}^2$ .

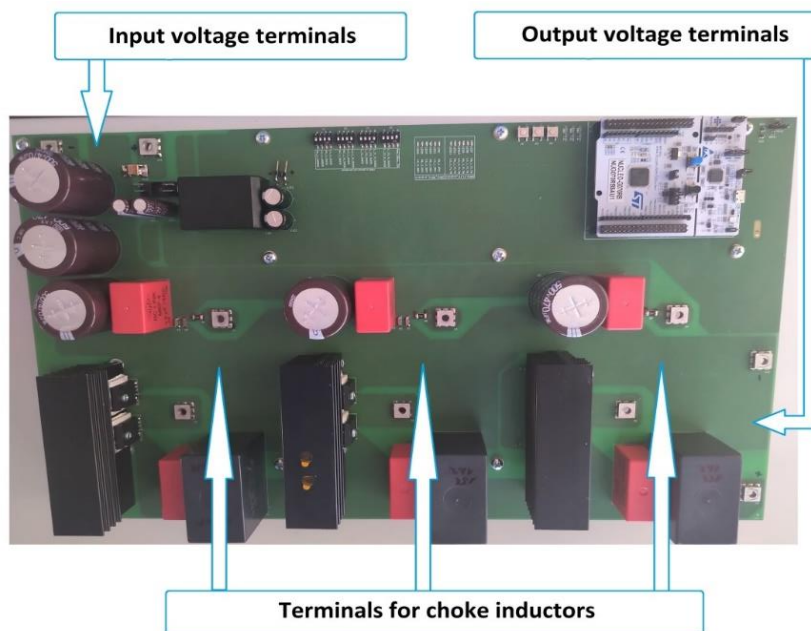
### 3.1.2 Riadenie meniča

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

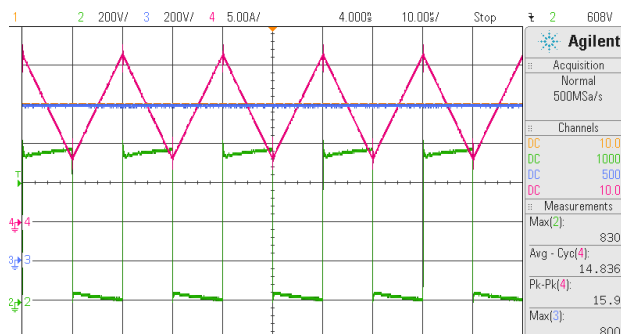
Na doske je umiestnená riadiaca *NUCLEO* doska s mikrokontrolérom, pripojovacie svorky meniča a svorky na pripojenie akumuláčnych tlmiviek.

## 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.



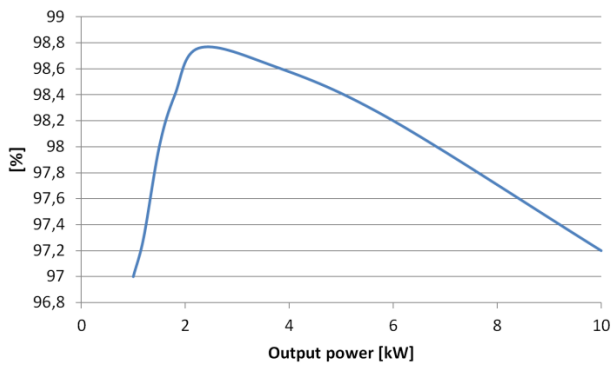
Obr. 8. *Oscilogram* z testovania meniča (výstupný výkon 6 kW na jednu fázu)

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](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>.