
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

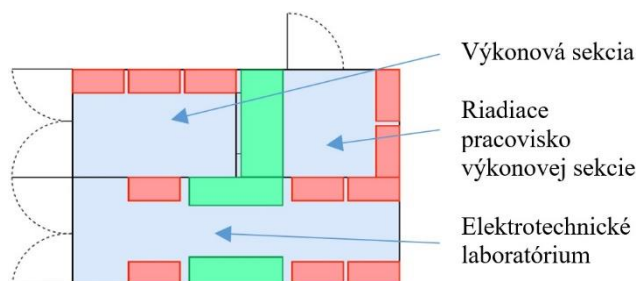
Komplexné experimentálne pracovisko na testovanie a výskum správania batériového úložiska prináša inovatívny prístup k analýze a optimalizácii výkonu akumulátorových zostáv. Navrhnuté je s ohľadom na veľkosť prietoku energie a celkovú kapacitu, využíva testovanie kľúčových častí batériových úložísk,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

Káblvé 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 káblvých 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.

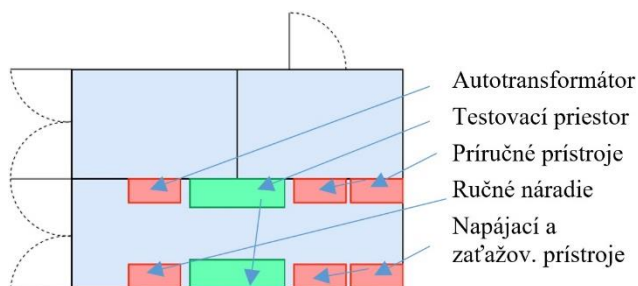
Testovací priestor pre experimentálne meranie nižších výkonov je navrhnutý podľa normy *ISO ČSN EN ISO/IEC 17025* [1], s využitím laboratórneho stola od spoločnosti "Alfa". Vybraný laboratórny stôl ponúka všestranné využitie s možnosťou prispôsobenia police a osvetlenie podľa potrieb technika. Táto variabilita 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 oddelovacím 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 sekciovou 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 zásuviek, 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 udržuje 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. Napájacia 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

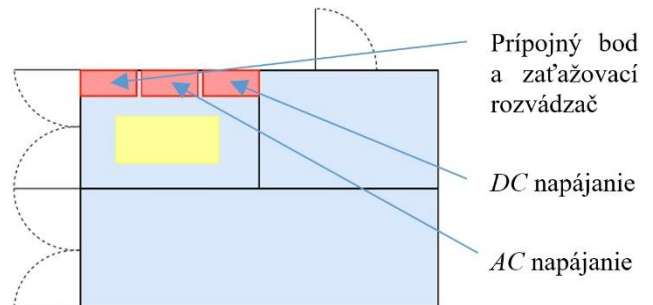
systémov využíva štandardizované rackové riešenia umiestnené v kontajneroch.

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.

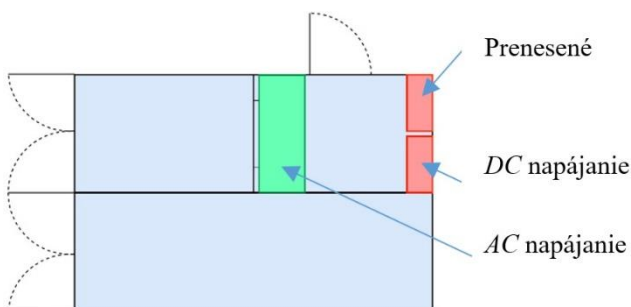
Vzdialený prístup do výkonovej sekcie je prvkom moderných experimentálnych pracovísk, umožňujúcim diaľkovú obsluhu a zvyšovanie efektivity práce. Výkonová sekcia je navrhnutá pre bezpečnú prevádzku bez prítomnosti obsluhy, a

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 sekciami. 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 kompetenci zkušebních a kalibračních laboratorí.* Praha: Úřad 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: Úřad 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: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 119 str. Třídící znak 332000.
- [4] ČSN EN 50518. *Dohledová a poplachová přijímací centra.* Praha: Úřad 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: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 23 str. Třídící znak 331345.