

ČESKÁ ELEKTROTECHNICKÁ SPOLEČNOST PRAHA

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

HATĚ 2025

ELEKTROTECHNICKÁ SPOLEČNOST PRAHA
VUT V BRNĚ

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

www.nzee.cz

Hatě 2025

Organizační výbor konference:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
Ing. Ladislav Chladil, Ph.D.
Gabriela Dominiková
Ing. Jiří Libich, Ph.D.

Programový výbor konference:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
doc. Ing. Zdeněk Dostál, CSc.
Ing. Ladislav Chladil, Ph.D.
prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
prof. Ing. Dušan Kudelas, Ph.D.
Ing. Jiří Libich, Ph.D.
doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.
prof. Ing. Peter Tauš, Ph.D.
doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
prof. RNDr. Petr Vanyšek, CSc.

Výbor recenzentů:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
doc. Ing. Zdeněk Dostál, CSc.
Ing. Ladislav Chladil, Ph.D.
doc. Ing. Dušan Kudelas, Ph.D.
doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.
doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.
Ing. Pavel Šimon, CSc.
prof. Ing. Peter Tauš, Ph.D.

ISBN 978-80-02-03089-8

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tato publikace obsahuje zkrácená znění původních sdělení a některých referátů přednesených na mezinárodní konferenci 46. Nekonvenční zdroje elektrické energie uspořádané v Hatích u Znojma ve dnech 2. - 4. června 2025 Českou elektrotechnickou společností (UOS pro chemické zdroje elektrické energie) a Fakultou elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.

Textové podklady jednotlivých příspěvků byly pořizovány přímo z originálů dodaných autory. Z tohoto důvodu vydavatel neodpovídá za jazykovou ani věcnou správnost uveřejněných textů.

OBSAH SBORNÍKU

O. Čech, A. Šimek, J. Báňa, L. Chladil, P. Bača a T. Kazda: Baterie a jejich řízení pro malé drony	5
H. Hálová, L. Chladil, L. Preisler a M. Kunz: Pokročilé metody syntézy pro lithno-iontové baterie: role spray-drying syntézy	9
K. Jandová, P. Vanýsek, J. Vaněk a M. Čepil: Chemická recyklace fotovoltaických článků	12
K. Jaššo, J. Báňa, O. Klvač, P. Čudek a T. Kazda: Baterie v jednorázových e-cigaretách - plýtvání kritickými materiály	15
T. Kazda: Recyklace Li-ion akumulátorů a její perspektivy	19
O. Klvač, D. Trochta, L. Novák a T. Kazda: Analýza dat z in-situ a operando SEM pozorování Li-ion baterií	22
J. Kasper, J. Kočí, K. Nováková, T. Finsterle, P. Hrzina a V. Knap: Sodíko-iontové baterie jako vhodná alternativa pro nízké teploty?	24
P. Křivík: Dynamika teplotních změn při opakovaném ochlazování a ohřevu olověného akumulátoru	27
J. Kurcz, J. Longauer a J. Poničan: Ročná prevádzka energetického systému s inteligentným riadením BESS a tepelného čerpadla za účelom znižovania spotreby primárnych energií	31
J. Poničan J. Longauer a J. Kurcz: Riadenie a regulácia energetického systému za účelom optimálnej využiteľnosti FVE bez pretokov	35
M. Řípa: Přelom (č. 2) ve vývoji řízené termojaderné fúze	39
M. Sedlařík, O. Koudelka a P. Vyroubal: Digitální dvojče v oblasti stacionárního bateriového úložiště	43
P. Šafl a J. Kolísek: Možnosti využití aditivních technologií pro výrobu mechanických částí pro FVE	46
M. Šedina a T. Kazda: Lithium-ion Battery Journey: from Experiment to Production Plant	49
A. Šimek, T. Kazda a O. Čech: Současný stav komerčních sodno-iontových baterií: materiály, technologie a budoucí směřování	52
D. Trochta, O. Klvač, L. Novák a T. Kazda: Instrumentace pro in-situ/operando SEM analýzu Li-ion akumulátorů	55
J. Vaněk a P. Maule: Vliv rozlišení zátěžového profilu na simulaci podílu vlastní spotřeby fotovoltaické elektrárny	58
P. Vanýsek a S. Bátorová: Vyhodnocení elektrochemické kinetiky z omezeného počtu bodů	61
P. Vyroubal, T. Kazda a M. Sedlařík: Physical and Reduced Modeling of LiIon Battery Thermal Abuse	64

BATERIE A JEJICH ŘÍZENÍ PRO MALÉ DRONY

O. Čech, A. Šimek, J. Báňa, L. Chladil, P. Bača a T. Kazda

Ústav Elektrotechnologie, Vysoké učení technické v Brně

Abstract

This article explores battery technologies used in small unmanned aerial vehicles (UAVs), focusing primarily on FPV drones and some commercial platforms. The work shows principles of battery management systems (BMS), ranging from simple protection circuits in FPV drone packs to more advanced, communication-enabled BMS modules in smart batteries. X-ray analysis will be presented for BMS diagnostics. Here we would like to provide examples of current battery formats, safety mechanisms, and data monitoring approaches utilized in small drones.

Úvod

V posledních letech zaznamenaly malé bezpilotní letouny (UAV), jako jsou FPV drony nebo komerční modely, prudký rozvoj jak v hobby, tak profesionální sféře. Klíčovým prvkem jejich spolehlivosti a výkonnosti jsou baterie, které zajišťují nejen pohon motorů, ale i napájení senzorů, řídicích jednotek a komunikačních systémů. Vzhledem k omezené nosnosti těchto strojů je optimalizace hmotnosti, energetické hustoty a řízení baterií zásadní pro dosažení delší doby letu a bezpečného provozu. Tento článek se zaměřuje na přehled používaných typů baterií – především lithium-polymerových (Li-Po) a lithium-iontových (Li-ion) článků – a jejich formátů, jako jsou pouch a cylindrické články. Dále bude rozebrána role BMS systémů (Battery Management System) v malých dronech, jejich schopnost balancování článků, ochrany proti přepětí či přehřátí, a také přenos telemetrických dat. Zvláštní pozornost bude věnována rozdílům v přístupech mezi FPV systémy, kde je častá absence pokročilého řízení baterie, a komerčními řešeními, kde je integrace chytrých BMS samozřejmostí.

Bateriové napájení představuje kritický subsystém malých bezpilotních leteckých prostředků (sUAV – small Unmanned Aerial Vehicles), který výrazně ovlivňuje jejich hmotnostní optimalizaci, dolet, dostupnou zátěž a celkovou provozní spolehlivost. S nástupem sofistikovaných funkcí, jako jsou autonomní řízení, přenos obrazu s nízkou latencí nebo pokročilé navigační algoritmy, rostou i požadavky na kvalitu, bezpečnost a predikci chování energetického zdroje. V tomto kontextu se baterie a jejich správa (Battery Management System – BMS) stávají nejen pasivními, ale aktivně řízenými komponenty celé avionické architektury. V oblasti malých UAV převažují lithium-iontové technologie, a to především ve formě lithium-polymerových (Li-Po) a cylindrických Li-ion článků typu 18650 nebo 21700, zejména z důvodu jejich vysoké specifické energie (typicky 150–250 Wh/kg) a schopnosti dodat vysoký proud (až 50 °C a více u FPV baterií). Nicméně, tyto baterie vykazují významnou citlivost na přepětí, podpětí, přehřátí či mechanické poškození, a proto je jejich řízení zásadní z hlediska provozní bezpečnosti, jak dokládají bezpečnostní směrnice např. podle normy IEC 62133 (pro přenosné baterie) či specifikace UN 38.3 (pro přepravu Li-ion baterií).

BMS systémy, ať už jednoduché pasivní balancéry nebo pokročilé mikrokontrolerem řízené jednotky s komunikací po sběrnici jako SMBus, I²C, UART nebo CAN, zajišťují nejen ochranu článků, ale často i telemetrický přenos dat do palubních počítačů dronu. V komerčních dronech (např. DJI Phantom 4) jsou tyto systémy plně integrovány a chráněny proprietárními protokoly, zatímco v otevřených systémech (např. ArduPilot, PX4) je běžná modulární architektura, kde lze použít volně dostupná řešení, jako je např. INA226 pro měření napětí a proudu nebo specializované BMS čipy typu BQ769x0 od Texas Instruments.

Baterie

Energie potřebná k provozu malých UAV je typicky dodávána elektrochemickými články na bázi lithiových technologií. Volba konkrétního typu baterie zásadně ovlivňuje nejen energetickou hustotu, ale i provozní stabilitu, tepelnou odolnost a integraci do mechanické konstrukce dronu.

V drtivé většině případů jsou v malých dronech využívány baterie na bázi Li-ion (Lithium-Ion) a Li-Pol (Lithium-Polymer):

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tab. 1: Přehled typů baterií pro malé drony.

Chemický typ	Zkratka	Typická napěťová platforma	Výhody	Nevýhody
Lithium-iontová (cyklindrická)	Li-ion	3,6–3,7 V/článek	Vysoká energetická hustota, dlouhá životnost	Omezený výstupní proud, riziko přehřátí
Lithium-polymerová	Li-Pol	3,7 V/článek	Vysoký výstupní proud (20 C– 100 C), tvarová flexibilita	Citlivost na poškození, nižší cyklická životnost

Li-Po články se staly de-facto standardem v závodní FPV scéně díky extrémně vysokým výstupním proudům (např. 100 A u 1300mAh 4S packu). Naopak u komerčních UAV, kde je preferována bezpečnost a životnost, dominují standardní Li-ion články, často typu 18650 nebo 21700.

FPV drony a baterie do nich

FPV drony (First Person View), oblíbené pro závodění a akrobatické létání, využívají především LiPo (lithium- polymerové) baterie. Tyto baterie jsou lehké, mají vysoký výkon (velký výstupní proud – často desítky až stovky ampér) a nízký vnitřní odpor, což je ideální pro náhlé výkyvy zatížení typické pro FPV lety.

Na rozdíl od běžných spotřebních baterií, FPV baterie zpravidla neobsahují BMS (Battery Management System). Důvodem je snaha o minimalizaci hmotnosti a zachování co nejvyššího výkonu. To ale znamená, že uživatel musí sám dohlížet na vyvážení článků, jejich nabíjení i vybíjení – obvykle pomocí externího nabíječe s balancerem a telemetrických systémů na dronu.

Baterie se liší počtem článků - pro různé velikosti a výkony dronů jsou baterie od 2S do 6S zapojení. Na Obr.1 je snímek baterií 6S pro FPV drony na bázi Li-Pol HV.

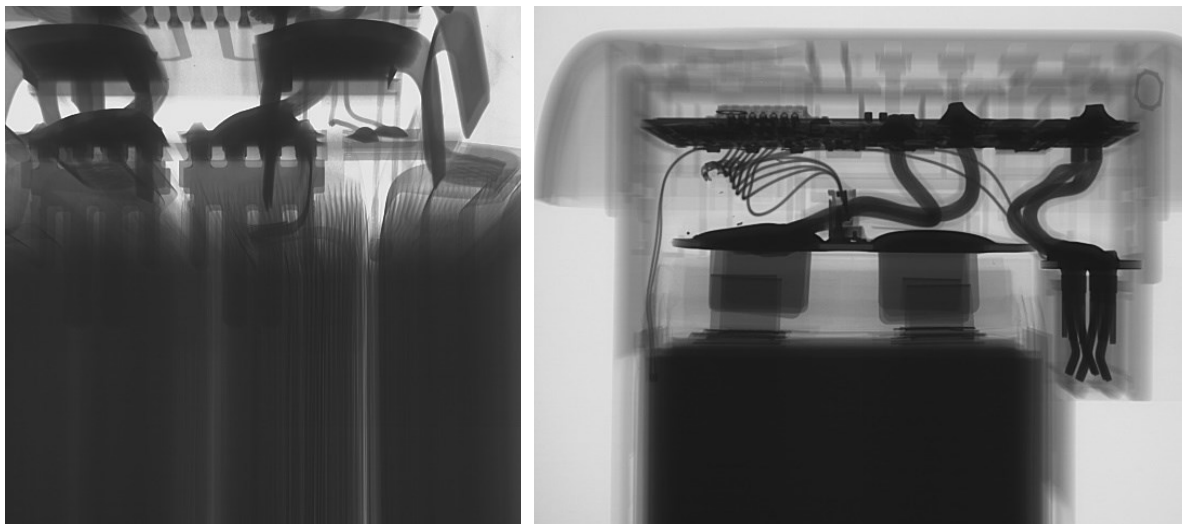


Obr. 1: Jednoduchá baterie 6S FPV dronu (neobsahuje BMS).

Pokročilé baterie s BMS

Uživatelské a průmyslové drony, na rozdíl od dronů FPV, musí garantovat bezpečnou správu a chování baterie, proto jsou vždy vybaveny určitou úrovní správy baterie-BMS (viz Obr. 2). Vzhledem k rizikům, která z provozování dronů plynou, jsou tyto BMS poměrně pokročilé a na rozdíl od běžné drobné elektroniky, obsahují BMS s rozsáhlou správou baterie a hlavně podrobnou komunikací. Příkladem takové baterie může být baterie pro běžně dostupný uživatelský dron čínské provenience.

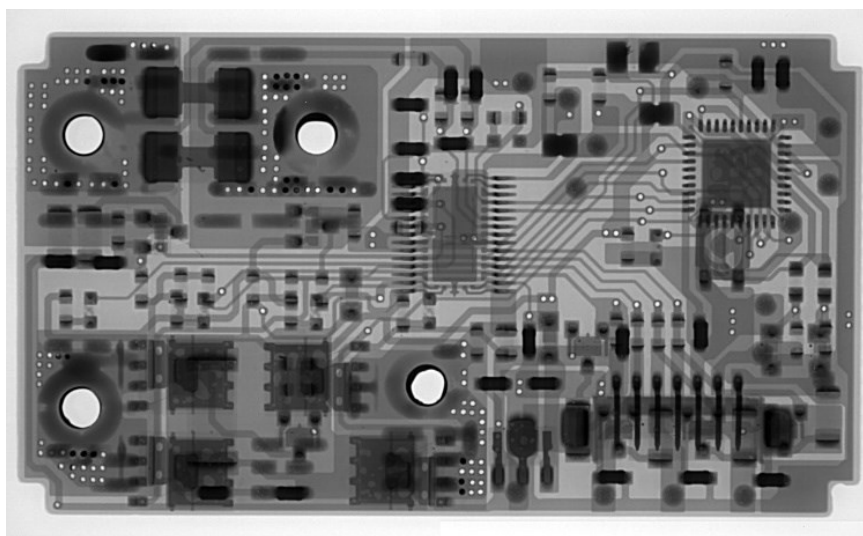
46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 2: Rentgenová analýza baterie se systémem BMS.

Fungování a popis BMS

Uvádíme zde příklad fungování komerční varianty BMS (Obr. 3), běžně dostupného zapojení založeném na produktech Texas Instruments. Na úrovni funkčního bloku lze BMS popsat takto: Články jsou přes balancovací obvody a měřicí vstupy připojeny k čipu BQ30Z55, který také snímá bočník (měří proud) a čte termistory. BQ30Z55 má výstupy na nabíjecí/ vybíjecí MOSFETy a na rezistor pro vybíjení. MSP430 MCU je spojen s BQ30Z55 sběrnici SMBus (I²C) a rovněž je připojen k tlačítku baterie a LED diodám. MCU ovládá LED, reaguje na stisk tlačítka a předává dál do dronu data z BMS (přes UART linku v konektoru baterie) Tím je zajištěno, že dron má neustále informace o napětí každého článku, celkovém stavu nabití, teplotách i případných výstrahách (např. nízké napětí, vadný článek apod.).



Obr. 3: Rentgenová analýza pokročilé BMS pro 4S články.

Vícečlánkový monitor a gauging čip: Jádrem systému je specializovaný integrovaný obvod Texas Instruments BQ30Z55. Je to manažer bateriového packu pro 2–4 články Li-Ion/Poly s funkcí měření kapacity (fuel gauge s algoritmem Impedance TrackTM), monitorování napětí článků, proudu a teploty a s bezpečnostní logikou BQ30Z55 periodicky měří napětí každého ze 4 článků (přes balancovací přívody), celkový proud tekoucí do/z baterie (přes bočníkový rezistor $\sim 0,02 \Omega$) a sleduje až dva teplotní senzory (TS1, TS2) Na základě toho počítá stav nabití (SOC), odhad zbývající kapacity, počet cyklů, atd., a hlídá ochranné limity – podpětí/přepětí článků, nadproud při vybíjení/nabíjení, přehřátí, apod. Při nebezpečném stavu BQ30Z55 odpojí baterii (odpojí FET tranzistory) a v kritických případech nastaví tzv. Permanent Failure, který vyžaduje servisní reset. Čip také zajišťuje balancování článků během nabíjení – má vestavěný balancér, který odebírá proud z přebítených článků

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

(typicky přes rezistory) a tím vyrovnává napětí všech článků. Kromě toho BQ30Z55 umí řídit interní vybíjecí okruh (rezistor) pro automatické pomalé vybití plně nabité baterie při nečinnosti.

Hlavní řídicí mikroprocesor: Na desce je přítomen mikrokontrolér TI MSP430 (řada MSP430G2755). Jde o 16bitový ultra-nízkoenergetický MCU, který v baterii plní dvě hlavní role: (1) komunikuje s BQ30Z55 a získává z něj data, (2) zprostředkovává komunikaci s letovým kontrolérem dronu. MCU přes rozhraní SMBus (Smart Battery System protokol, odvozený od I²C) dotazuje BQ30Z55 na údaje o stavu baterie (napětí, proud, kapacita, teploty, chyby...) a ukládá či předává je dál. Zároveň obsluhuje vnější rozhraní baterie: čte stav tlačítka zapínání a ovládá LED diody indikující úroveň nabití. Při zapnutí baterie (typicky dvojitisk tlačítka) MCU zajistí rozsvícení LED a sepnutí výstupu baterie.

Komunikace s dronem: nepředává data baterie do dronu přes I²C/SMBus, ale využívá seriové UART rozhraní. Baterie má dva datové piny, které tvoří sériovou linku (TX/RX) propojenou s řídicí elektronikou. Na některých PCB jsou tyto piny chybně označeny jako "SCL/SDA", ale ve skutečnosti to není I²C sběrnice k letovému kontroléru, nýbrž UART s parametry 115200 Bd. BMS MCU tedy překládá údaje ze SBS protokolu do jednodušší seriové komunikace – periodicky posílá do dronu informace o napětí, % kapacity, stavu nabití atd. (Dron bez platné komunikace baterie nespustí motory, což znemožňuje obejít „chytrou“ baterii jen připojením jiné Li-Po.)

Závěr

V tomto příspěvku byly představeny a shrnuty možné přístupy k nasazení Li-Ion a Li-pol baterií v UAV dronech. Bylo zde popsáno schematické fungování pokročilé BMS pro komerční malé drony.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (č. FEKT-S-23-8286).

POKROČILÉ METODY SYNTÉZY PRO LITHNO-IONTOVÉ BATERIE: ROLE SPRAY-DRYING SYNTÉZY

H. Hálová¹, L. Chladil¹, L. Preisler² a M. Kunz

1 Ústav elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika

2 Energetický ústav, FSI, VUT v Brně, Technická 2896, 616 69 Brno, Česká republika

Abstract

The growing demand for electronic devices increases the requirements for battery performance, including energy density, safety, and cost-efficiency. Spray drying synthesis has emerged as a promising method for preparing cathode materials due to its scalability, fast processing, and ability to produce homogeneous, submicron powders. Compared to conventional methods, it offers shorter calcination times and lower energy consumption. Further improvements in material properties can be achieved through doping (e.g., with Mn, Ni, Co), while optimized thermal treatment ensures proper crystallization and electrochemical performance.

Úvod

S rostoucím počtem elektronických zařízení i rozvojem elektromobility stoupají požadavky na výkonnější, bezpečnější a zároveň levnější baterie. Mezi klíčové parametry dnes patří nejen energetická hustota a životnost, ale i rychlost nabíjení, ekologická zátěž výroby a schopnost recyklace. Lithno-iontové baterie se v posledních dekádách staly dominantním typem akumulátorů pro přenosnou elektroniku, elektromobily i stacionární úložiště energie z obnovitelných zdrojů. [1]

Významnou část ceny baterie – až 50 % – může tvořit cena katody, přičemž konkrétní náklady závisí zejména na chemickém složení a obsahu drahých nebo obtížně dostupných prvků. Důležitou roli však hraje nejenom volba samotného materiálu, ale i způsob jeho přípravy. Pro přípravu katodových materiálů se využívají různé techniky syntézy, přičemž o vhodnosti konkrétního typu syntézy rozhodují specifické požadavky a aplikace. [1], [2]

Přehled syntetizačních metod

Mezi hlavní metody přípravy katodových materiálů patří reakce pevné fáze (solid-state method), sol-gel, hydrotermální a spray drying syntéza. Každá z metod má specifické výhody a nevýhody, jejichž přehled je uveden v Tab. 1. [1] [2]

Jak je patrné z přehledu syntetizačních technik, jednotlivé metody trpí specifickými problémy – například dlouhou dobou reakce, potřebou vysokých teplot nebo nedostatečnou homogenitou výsledného materiálu. Je proto důležité vhodně zvolit syntetizační techniku podle požadavků konkrétní aplikace. Mezi slibné syntetizační metody se řadí spray drying syntéza, která umožňuje rychlou a energeticky úspornou výrobu homogenních prášků s řízenou velikostí částic. Tento přístup navíc nabízí potenciál pro zkrácení či snížení teplot následného kalcinačního procesu, který představuje energeticky nejnáročnější část výroby [1], [2].

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tab. 1: Srovnání jednotlivých syntetizačních metod. [1], [2]

Typ syntézy	Výhody	Nevýhody
Pevná fáze (solid state)	Jednoduchost, nízká cena	Využití vysoké teploty, dlouhý reakční čas, nehomogenita
Sol-gel	Vznik uniformních a homogenních částic, dobrá kontrola stechiometrie, nízká reakční teplota	Delší reakční čas, nutnost kontroly roztoku prekursorů, vysoké výrobní náklady
Hydrotermální/solvotermální	Přesná kontrola morfologie, chemická čistota	Potřeba speciálního vybavení, nutnost kontroly reakce
Spray drying	Potenciální snížení energetické náročnosti, vznik homogenních částic, škálovatelnost výroby	Vysoké vstupní náklady, nutnost větších objemů roztoku prekursorů

Spray drying syntéza a její využití

Spray drying syntéza je progresivní syntetizační technika, která umožňuje tvorbu submikronových částic s homogenním rozložením prvků. Tato metoda spočívá v rozprašování roztoku prekursorů do sušící nádoby, kde dojde k vysušení kapiček. Výsledným produktem je pak práškový materiál s rovnoměrnou distribucí prvků, ideální pro následné tepelné zpracování v průběhu kalcinace.

Výhodou této metody je její škálovatelnost a snadná příprava roztoků na vodní či etanolové bázi, která umožňuje přesnou kontrolu složení finálního materiálu [1], [2]. Mezi výhody však také patří jednoduchá tvorba roztoku prekursorů na vodní bázi, což umožňuje poměrně přesnou kontrolu složení a rovnoměrnou distribuci prvků ve výsledném produktu. Naopak, mezi nevýhody spray drying procesu patří zejména ve vysoké pořizovací ceně speciálního vybavení a potřebě velkého množství roztoku (a tím i prekursorů), které vytvoří velké množství výsledného produktu, což není zejména v laboratorních podmínkách žádoucí. [1], [2].

Výzvou v případě spray drying syntézy může být i zachyt vznikajících submikronových částic. K tomuto účelu se využívají různé techniky, jako je gravitační usazování, cyklónové odlučování, filtrace a využití elektrostatického odlučovače. [1]

Dopování materiálů

Přestože mají některé katodové materiály – např. LiFePO_4 – výbornou chemickou a tepelnou stabilitu, jejich praktické využití může být omezeno nízkou elektronovou či iontovou vodivostí. Za pomoci takzvané dopace můžeme zlepšit elektrochemické vlastnosti katodového materiálu. V průběhu dopace je část atomů v krystalové mřížce nahrazena jinými prvky. Mezi běžně využívané prvky patří Mn, Ni, Co, Mg, Cr, či Zn. Konkrétní příklady dopování materiálu jsou patrné v následující tabulce 2, kde jsou uvedeny některé z možností dopace materiálu LFP.

Tab. 2: Přehled materiálů využívaných k dopování tradičního katodového materiálu LFP.

Materiál	Dopující prvek	Typ syntézy	Vybíjecí kapacita (mAh/g)	C rate (-)	Ref.
$\text{LiMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{PO}_4$	Mn	Spray drying	140	0.2 C	[3]
$\text{LiMn}_{0.25}\text{Fe}_{0.75}\text{PO}_4/\text{C}$	Mn	Hydrotermální	124	0.15 C	[4]
$\text{LiMn}_{0.02}\text{Fe}_{0.98}\text{PO}_4/\text{C}$	Mn	Pevná fáze	149	0.1 C	[5]
$\text{LiFe}_{0.9}\text{Mn}_{0.05}\text{Ni}_{0.05}\text{PO}_4/\text{C}$	Mn + Ni	Pevná fáze	118	0.1 C	[6]
$\text{LiFe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{PO}_4/\text{C}$	Ni	Pevná fáze	140	0.1 C	[6]
$\text{LiFe}_{0.98}\text{Ni}_{0.01}\text{Co}_{0.01}\text{PO}_4/\text{C}$	Ni + Co	Pevná fáze	158	0.1 C	[7]
$\text{LiFe}_{0.99}\text{Mg}_{0.005}\text{Co}_{0.005}\text{PO}_4$	Mg + Co	Pevná fáze	147	0.1 C	[8]

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tepelné zpracování

Tepelné zpracování, též označované jako kalcinace, představuje klíčový krok při syntéze katodových materiálů, během něhož dochází k odstranění organických složek, tvorbě krystalické struktury a ustálení finální fáze. Hlavními parametry kalcinace jsou teplota, doba kalcinace, prostředí, rychlost zahřívání a ochlazování materiálu. Teplota a délka kalcinace se liší dle konkrétního katodového materiálu. V případě LFP materiálu je udáváno teplotní rozmezí mezi 500 a 900 °C, v délce od 4 do 34 hodin v dusíkové, či argonové atmosféře. [9], [10]

Právě v kontextu spray drying syntézy, která poskytuje jemné, homogenní a často amorfni prekurzory, se nabízí potenciál výrazného zkrácení doby kalcinace. Díky rovnoměrné distribuci prvků v částicích vzniklých během rozprašování je možné dosáhnout požadované krystalinity při nižších teplotách a v kratších časech, což přispívá ke snížení energetické náročnosti celého procesu. [2]

Závěr

Syntéza katodových materiálů pro lithium-iontové baterie je zásadním krokem, který ovlivňuje nejen jejich elektrochemické vlastnosti, ale i celkovou efektivitu a ekonomiku výroby. S rostoucími nároky na výkon, bezpečnost, udržitelnost a snižování nákladů je nezbytné optimalizovat nejen chemické složení samotných materiálů, ale i procesy jejich přípravy.

Spray drying syntéza představuje perspektivní metodu, která umožňuje rychlou tvorbu submikronových uniformních částic. Díky tomu nabízí možnost zkrácení délky či snížení teploty kalcinace – jednoho z energeticky nejnáročnějších kroků výroby. Tento přístup může přispět nejen ke snížení energetické náročnosti, ale také ke zlepšení kvality výsledného materiálu. Kromě samotné metody syntézy hraje důležitou roli i volba vhodných prekurzorů a cílená úprava složení materiálu pomocí dopování, která umožňuje zlepšovat slabé stránky daných katodových materiálů a ovlivňovat tak vodivost, kapacitu a cyklickou stabilitu.

Spray drying syntéza tak do budoucna představuje atraktivní cestu nejen pro výzkum a vývoj nových typů katodových materiálů, ale i pro jejich udržitelnou a průmyslově realizovatelnou výrobu.

Poděkování

Tato práce byla podpořena specifickým vysokoškolským výzkumem Vysokého učení technického v Brně, projekty č. FEKT-S-23-8286 a FEKT/FSI-J-24-8579

Literatura

- [1] B. Vertruyen, N. Eshraghi, C. Piffet, J. Bodart, A. Mahmoud, and F. Boschini, "Spray-Drying of Electrode Materials for Lithium- and Sodium-Ion Batteries", *Materials*, sv. 11, č. 7, 2018.
- [2] T. A. Wani and G. Suresh, "A comprehensive review of LiMnPO₄ based cathode materials for lithium-ion batteries: current strategies to improve its performance", *Journal of Energy Storage*, sv. 44, 2021.
- [3] X. Zhang, M. Hou, A. G. Tamirate, H. Zhu, C. Wang, and Y. Xia, "Carbon coated nano-sized LiMn_{0.8}Fe_{0.2}PO₄ porous microsphere cathode material for Li-ion batteries", *Journal of Power Sources*, sv. 448, 2020.
- [4] G. Meligrana, F. Di Lupo, S. Ferrari, M. Destro, S. Bodoardo, N. Garino, and C. Gerbaldi, "Surfactant-assisted mild hydrothermal synthesis to nanostructured mixed orthophosphates LiMn_yFe_{1-y}PO₄/C lithium insertion cathode materials", *Electrochimica Acta*, sv. 105, s. 99-109, 2013.
- [5] H. Yang, Z. Pan, L. Wang, C. Liu, Z. Wang, C. Zhang, and W. Lu, "Enhancing electrochemical performance of Mn doped LiFePO₄ cathode materials for lithium-ion batteries", *International Journal of Electrochemical Science*, sv. 18, s. 4, 2023.
- [6] C. Nayak, V. Bhasin, K. K. Halankar, S. Banerjee, A. Bute, S. N. Jha, and D. Bhattacharyya, "Operando X ray absorption spectroscopy elucidating the de-lithiation/lithiation mechanism of Mn and Ni co-doped LiFePO₄ cathodes", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, sv. 969, 2024.
- [7] G. R. Kiani, S. Boroomand, R. Khodabakhshi, and M. Esmaeili, "A novel co-doped LiFePO₄/C cathode material, modified for enhanced high power density battery applications", *Microelectronic Engineering*, sv. 136, s. 77-80, 2015.
- [8] Y. -huai DING and P. ZHANG, "Effect of Mg and Co co-doping on electrochemical properties of LiFePO₄", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, sv. 22, s. 153-156, 2012.
- [9] Z. Chen, Q. Zhao, M. Xu, L. Li, J. Duan, and H. Zhu, "Electrochemical properties of self-assembled porous micro-spherical LiFePO₄/PAS composite prepared by spray-drying method", *Electrochimica Acta*, sv. 186, s. 117-124, 2015.
- [10] C. Chen, C. Luo, Y. Jin, J. Li, Q. Zhao, and W. Yang, "Short-Process Spray-Drying Synthesis of Lithium Iron Phosphate@Carbon Composite for Lithium-Ion Batteries", sv. 12, č. 37, s. 14077-14086, 2024.

CHEMICKÁ RECYKLACE FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

K. Jandová, P. Vanýsek, J. Vaněk a M. Čepil

*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Ústav elektrotechnologie, Technická 3058/10, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika*

Abstract

The increasing global deployment of photovoltaic (PV) technology has raised critical concerns regarding the sustainable management of PV panels at the end of their operational life. A major complication lies in the complex composition of these panels, where polymeric materials such as encapsulants, back sheets, and adhesives impede effective recycling. Traditional mechanical and thermal recycling methods often result in material degradation or require high energy input, undermining both economic and environmental goals. This study investigates an alternative approach focused on the selective recovery of polymeric components using organic solvents. By applying solvent-based delamination and dissolution techniques, we aim to achieve efficient material separation while preserving the integrity and quality of recovered materials.

Úvod

S rostoucím celosvětovým rozšířením fotovoltaických (FV) technologií nabývá problematika nakládání s FV panely na konci jejich životního cyklu stále většího významu jak z environmentálního, tak z ekonomického hlediska. Podstatnou část těchto panelů tvoří polymerní materiály — zejména enkapsulanty, zadní fólie a lepidla — jejichž přítomnost značně komplikuje procesy recyklace. Konvenční mechanické a tepelné recyklační metody často vedou k degradaci hodnotných materiálů či vykazují vysokou energetickou náročnost. Předkládaná studie se proto zaměřuje na alternativní přístup, konkrétně na selektivní separaci polymerních komponent FV panelů za použití organických rozpouštědel. Cílem využití metod založených na delaminaci a cíleného rozpouštění polymerních vrstev je dosáhnout efektivnější separace materiálů, zachování jejich funkčních vlastností a celkového zvýšení udržitelnosti procesu recyklace FV zařízení.

K perspektivním skupinám organických rozpouštědel vhodných pro interakci s polymery FV panelů patří zejména polární aprotická rozpouštědla, například dimethylformamid (DMF), dimethylsulfoxid (DMSO) či *N*-methylpyrrolidon (NMP), která vykazují schopnost účinně narušovat struktury síťovaných polymerů, jako je ethylenvinylacetát (EVA). Účinná, avšak environmentálně problematická, jsou rovněž chlorovaná rozpouštědla, například dichlormethan (DCM) a chloroform, jejichž použití je nutno posuzovat s ohledem na platné legislativní normy a zdravotní rizika. Se zvyšujícími se požadavky na ekologickou šetrnost se do popředí zájmu dostávají rovněž biomateriálově odvozená rozpouštědla, jako je γ -valerolakton (GVL), a různé typy iontových kapalin. Významnou perspektivu nabízejí i pokročilé systémy, například hluboké eutektické směsi (DES) a přepínatelná rozpouštědla, která umožňují reverzibilní změnu chemických vlastností za mírných podmínek a nabízejí nové možnosti selektivního zpracování polymerních vrstev. Výběr optimálního rozpouštědla bude nezbytné podřídit komplexnímu hodnocení kompatibility s cílovými polymery, selektivity procesu, možnosti regenerace rozpouštědla, provozní bezpečnosti a celkového environmentálního dopadu.

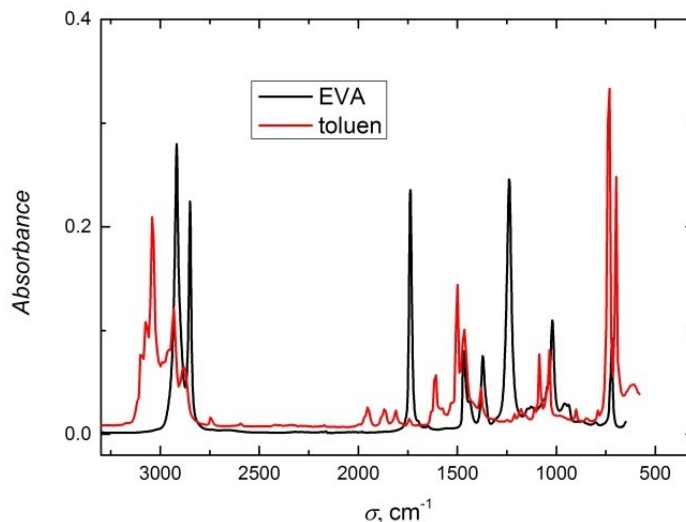
Ke zkoumání narušení existující folie EVA bylo použito několik rozpouštědel, o kterých bylo možno předpokládat, dle jejich Hildebrandových koeficientů, že by mohla být vhodná ke změkčení či rozpuštění folie deponované na skleněném substrátu. Následující rozpouštědla, o běžné laboratorní čistotě, byla použita:

1. Toluén
2. Dimethylformamid
3. Aceton (dimethylketon)
4. *N*-methylpyrrolidon (NPM) (1-methyl-2-pyrrolidon)
5. Ethylacetát (ethylester kyseliny octové)
6. *o*-xylen (1,2 dimethylbenzen)

Procedura obecně sestávala z toho, že vzorek EVA folie na skleněném substrátu byl vystaven kapalnému rozpouštědlu po danou dobu (obvykle 24 hodin) a efekt rozpouštědla na konzistenci EVA folie (kupř. bobtnání, narušení, sloupení) byl pozorován. Kvantitativně byl efekt rozpouštědla měřen na vzorcích EVA folie samotné. Vzorek byl před prvním vystavením vlivu rozpouštědla vysušen a zvážen. Po interakci s rozpouštědlem byl vzorek za vyšší teploty opět vysušen a zvážen. Vzhledem k vysoké těkavosti všech rozpouštědel lze předpokládat, že ve vzorku po jejich zahřátí bylo veškeré rozpouštědlo odstraněno, a tedy pokud došlo k úbytku hmotnosti vzorku, byl tento úbytek způsoben rozpuštěním polymeru v daném rozpouštědle.

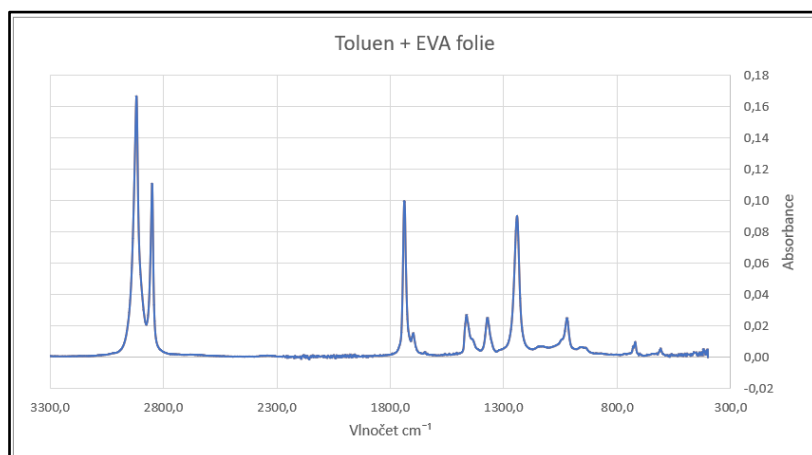
46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Rovněž byla studována přítomnost polymeru, případně degradačních produktů polymeru v odparce po extrakci z polymeru. Zde uvedeme jako příklad zkoumání vzorku v toluenu. Na Obr. 1 je ukázáno standardní spektrum EVA a toluenu.



Obr. 1: Standardní IR spektrum polymeru EVA a toluenu.

Jak je vidět, u některých vlnočtů se odezva obou látek překrývá, nicméně existují oblasti, které jsou rozdílné pro obě látky a proto je možné jejich přítomnost ve vzorku potvrdit nebo vyloučit.

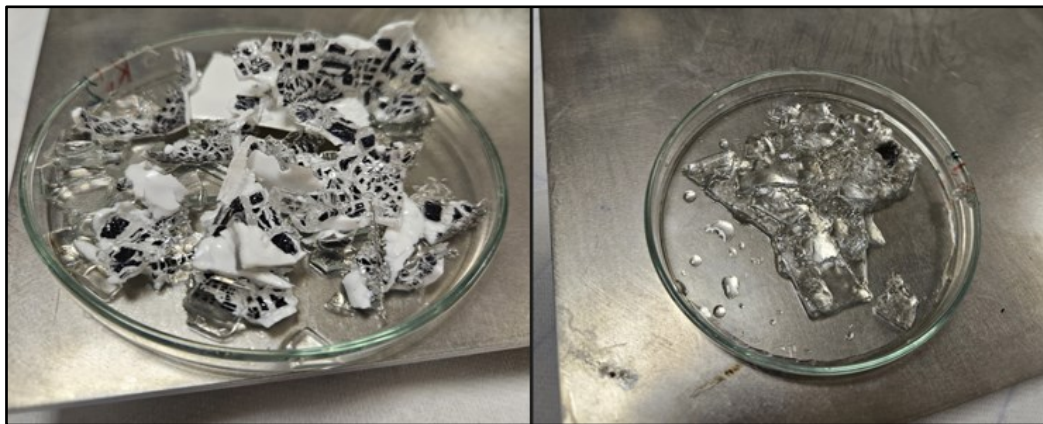


Obr. 2: Spektra vzorku rozpouštědla toluen a EVA folie.

Obr. 2 ukazuje spektrum odparu po loužení EVA vzorku v toluenu. Jak je ze spektra patrné, ve vzorku po vysušení není zbytek toluenu, ale spektrum odpovídá v principu standardnímu vzorku EVA. Předpokládáme, že jde skutečně o zachovalý polymer a nikoliv monomerní složky, které by při sušení vzorku nejspíš vytékaly.

Po vystavení vzorku rozpouštědлу bylo často pozorováno, že skleněný substrát se láme či trhá, viz Obr. 3. To bylo způsobeno bobtnáním EVA materiálu, změnou jeho rozměrů a následně působením mechanické síly na substrát.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 3: Solární článěk a fólie EVA po působení toluenu.

Shrnutí výsledků

Cílem této studie bylo posoudit možnou vhodnost různých rozpouštědel pro chemickou recyklaci solárních článků, zejména se zaměřením na odstranění EVA folie z křemíkových solárních článků. Použitá rozpouštědla byla toluen, dimethylformamid, aceton, *N*-methylpyrrolidon, ethylacetát a *o*-xylen). Výsledky ukázaly podle očekávání, že různá rozpouštědla mají různý vliv v závislosti na délce expozice, teplotě a jejich chemických vlastnostech. Toluen a *o*-xylen se ukázaly jako nejúčinnější rozpouštědla, protože umožnily snadnou separaci vrstev solárního článku a významně ovlivnily strukturu EVA folie. Po krátké expozici došlo k výraznému bobtnání a změně struktury EVA folie, což naznačuje jejich vysoký potenciál pro recyklaci. Toluen však vykazoval také vyšší riziko prasknutí okolních materiálů (sklíček) kvůli své agresivitě a výraznému bobtnání. Naopak *o*-xylen vykazoval pomalejší, ale rovnoměrnější účinek bez mechanického poškození sklíček, což může být výhodnější pro recyklaci solárních panelů ve velkém měřítku při podmínce zachování celistvosti substrátu. Dimethylformamid a aceton nebyly tak efektivní při separaci vrstev a prokázaly minimální změny i po prodloužené expozici. Ethylacetát se také neprojevil jako účinný, přičemž po 72 hodinách nebyly pozorovány žádné viditelné změny na solárních článcích ani na samotné EVA folii.

V další fázi experimentu, kde byla testována účinnost rozpouštědel na nepoškozenou EVA folii mezi dvěma sklíčky, byl pozorován pozitivní účinek zejména u toluenu a *o*-xylen, které dokázaly oddělit sklíčka a ovlivnit strukturu EVA folie. Test s methylpyrrolidonom ukázal pouze minimální změny po 96 hodinách, což předpovídá jeho nižší užitečnost v tomto kontextu.

Celkově lze konstatovat, že pro chemickou recyklaci solárních článků se jako nejúčinnější ukazují toluen a *o*-xylen, přičemž bezpečnostní opatření při jejich použití musí být důkladně zvažována, zejména z hlediska toxicity a hořlavosti. Pro praktické použití v průmyslových podmínkách bude důležité zvolit rozpouštědlo, které nabízí optimální kombinaci účinnosti, bezpečnosti a environmentální šetrnosti.

Nová je kupříkladu metoda recyklace fotovoltaických modulů šetrná k životnímu prostředí založená na použití hluboce eutektických rozpouštědel s přepínatelnou hydrofilností [1]. Bylo dosaženo efektivního oddělení složek PV modulů včetně bezpečné extrakci EVA vrstvy bez použití toxických rozpouštědel jako je toluen nebo *o*-xylen. Tento proces umožňuje udržitelné a efektivní recyklování, přičemž je kompatibilní s průmyslovými procesy a šetrný k životnímu prostředí. Jako další možnost přímého pokračování v této práci je možné se zaměřit na směsná rozpouštědla. Kupříkladu v [2] bylo pozorováno, že rozpustnost polymeru v dichlorethanu byla značně zvýšena i jen *malým* přídavkem etanolu.

Poděkování

Tato práce byla podpořena specifickým vysokoškolským výzkumem VUT v Brně č. FEKT-S-23-8286.

Literatura

- [1] B.-T. Yang, Y.-H. Huang, a C.-C. Chen, Hydrophobic deep eutectic solvents as novel media for the recycling of waste photovoltaic modules, *Chemical Engineering Journal* 498 (2024) 155011.
- [2] C. Madsen, A. Skov, L. Jorgensen, S. Baldursdottir a N. Medlicott: Effect of mixed solvents on polymer conformation-correlation between the hildebrand/hansen solubility parameters and the intrinsic viscosity of polymer solutions. *Annual Transactions of The Nordic Rheology Society*, 21 (2013) 347-352.

BATERIE V JEDNORÁZOVÝCH E-CIGARETÁCH – PLÝTVÁNÍ KRITICKÝMI MATERIÁLY

K. Jaššo^{1,2}, J. Báňa¹, O. Klvač^{1,3}, P. Čudek¹ a T. Kazda¹

1 Ústav elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika

2 Katedra elektrotechniky, FVT, Univerzita Obrany v Brně, Kounicova 65, 612 00 Brno, Česká republika

3 Thermo Fisher Scientific, Vlastimila Pecha 12, Brno, 627 00, Czech Republic

Abstract

As the most popular battery type in the world, lithium-ion secondary batteries are propelling innovations in a wide range of applications, including electric vehicles, cellphones, and drones. Li-ion batteries are thus currently used in a wide range of products, even in applications where they do not necessarily need to be used. This study investigates the use of these batteries in disposable e-cigarettes, focusing on their material composition and the implications for raw material consumption. The consumption of disposable e-cigarettes using Li-ion secondary cells, which could otherwise endure several hundred cycles if reused, results in the Czech Republic discarding materials that could be repurposed to produce dozens of battery packs for electric vehicles annually. This highlights a significant inefficiency in resource utilization and underscores the need for improved recycling and reuse strategies.

Úvod

S rychlým růstem trhu s Li-ion bateriemi se neustále zvyšuje poptávka po materiálech, ze kterých jsou vyrobeny. Tato poptávka je hlavně poháněna plánovaným přechodem na elektrická vozidla, která ve svých bateriích používají velké množství prvků, jako jsou lithium, nikl, kobalt, mangan, hliník a měď. Většina těchto prvků je Evropskou unií klasifikována jako kritické (Critical Raw Materials, CRM) nebo strategické suroviny (Strategic Raw Materials, SRM) [1][2]. EU usiluje o zajištění udržitelného dodávání těchto prvků a jejich oběhového hospodářství, aby splnila své klimatické cíle a zajistila průmyslovou konkurenceschopnost [2][3]. Kromě zvýšeného využívání těchto materiálů v rostoucí elektromobilitě se však v posledních letech objevily i další aplikace, jejichž spotřeba CRM není na první pohled zřejmá, jako například elektronické cigarety (e-cigarety).

Ve většině vyspělých zemí je užívání tabáku považováno za jednu z nejzávažnějších příčin úmrtí a chronických neinfekčních onemocnění, kterým lze předcházet. Přestože počet uživatelů tabáku v České republice od roku 2012 pomalu klesá, podle každoročního průzkumu Státního zdravotního ústavu (NAUTA – Národní výzkum užívání tabáku a alkoholu v České republice) bylo v roce 2023 kuřáků přibližně 24,6 % z celkové populace [4]. Podle projektu Česko v datech je Česká republika na 7. místě na světě ve spotřebě cigaret, přičemž na každého člověka staršího 15 let připadá v průměru přes 2 400 cigaret ročně [5]. Vzhledem k věkové struktuře české populace tvoří 83,83 % (9,08 milionu) z celkového počtu obyvatelstva osoby starší 15 let, z čehož vyplývá, že se v České republice ročně vykouří přibližně 21,8 miliardy cigaret [6]. Podle údajů výrobců (JT International) je však celkový trh s tabákovými výrobky v posledních několika letech poměrně stabilní, ročně se prodá necelých 23 miliard cigaret (a jejich ekvivalentů), což znamená, že každý člověk starší 15 let ročně spotřebuje přibližně 2600 cigaret (a jejich ekvivalentů) [7]. Podobné údaje uvádí i „Zpráva o tabáku, nikotinu a souvisejících výrobcích v České republice“, která uvádí spotřebu cigaret na jednoho obyvatele v letech 2009-2020 v rozmezí 1894-2071 cigaret, což znamená, že průměrný kuřák spotřebuje přibližně 479-528 krabiček cigaret ročně [8].

Oblíbenou alternativou kouření cigaret jsou e-cigarety. Lze je rozdělit do 3 hlavních kategorií: tanky/mody, dobíjecí e-cigarety (cartridge/pody) a jednorázové e-cigarety. Podle Tabákového atlasu se podíl jednotlivých typů e-cigaret na trhu liší podle země prodeje a roku, nicméně v USA, například v roce 2021 tvořily e-cigarety na jedno použití 53,7 % trhu s e-cigaretami a v roce 2022 dokonce 55,3 % [9]. Podle každoročního průzkumu Státního zdravotního úřadu kouří v Česku e-cigaretu alespoň jednou měsíčně přibližně 11,1 % respondentů, 6,1 % používá e-cigaretu denně a 45,0 % uživatelů e-cigaret používá jednorázové e-cigarety [4]. Většina e-cigaret na jedno použití obsahuje baterii s průměrnou kapacitou kolem 400 mAh a vydrží zhruba 500-600 potahů. V průměru obsahují 2 ml e-liquidu (maximum je 10 ml) o síle nikotinu až 20 mg/ml, což znamená, že jedna jednorázová e-cigareta přibližně odpovídá krabičce cigaret [8]. Podle průzkumu z roku 2023 provedeného společností Ecobat je vyhazování baterií do odpadkových košů běžnou praxí napříč různými věkovými skupinami. Z údajů vyplývá, že 66,7 % populace ve věku 18-26 let, 55,6 % populace ve věku 27-35 let, 61,1 % populace

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

ve věku 36-44 let a 46,2 % populace ve věku 45-53 let vyhazuje své e-cigarety do odpadkových košů, což poukazuje na významný environmentální problém týkající se správné likvidace a recyklace baterií [10].

Experiment

Různé jednorázové e-cigarety byly rozebrány (viz Obr. 1), ze kterých byly následně vyjmuty baterie a podrobeny měření. Všechna elektrochemická měření byla prováděna pomocí potenciostatu BioLogic VMP3 se softwarem EC-Lab. Naměřená kapacita byla porovnána s kapacitou uvedenou na obalu baterie. Na základě tvaru vybíjecích křivek byl pro další analýzu vybrán reprezentativní vzorek šesti baterií. Vybrané baterie pocházely z e-cigaret značek WAKA, VENIX, SALT, LIO NANO, ELFBAR a MOTI PIIN. Kromě toho byla pro srovnání analyzována jedna baterie z e-cigarety s dobíjecí kazetou (RELX Essential). Poté byly všechny analyzované baterie rozebrány a jednotlivé komponenty byly zváženy za účelem analýzy jejich složení, přičemž zvláštní pozornost byla věnována zejména materiálu katody. Z katodového materiálu byl vystřížen vzorek o rozměrech 5x5 mm, který byl poté připevněn k měděné destičce a umístěn do držáku na vzorky. Vzorek byl leštěn pomocí systému CleanMill Broad Ion Beam System (Thermo Fisher Scientific) při napětí 16 kV v režimu příčného řezu. Nakonec byl vzorek zkoumán pomocí systému SEM Apreo 2 (Thermo Fisher Scientific) vybaveného analýzou EDS a technologií ColorSEM.



Obr. 1: Složení jednorázové e-cigarety.

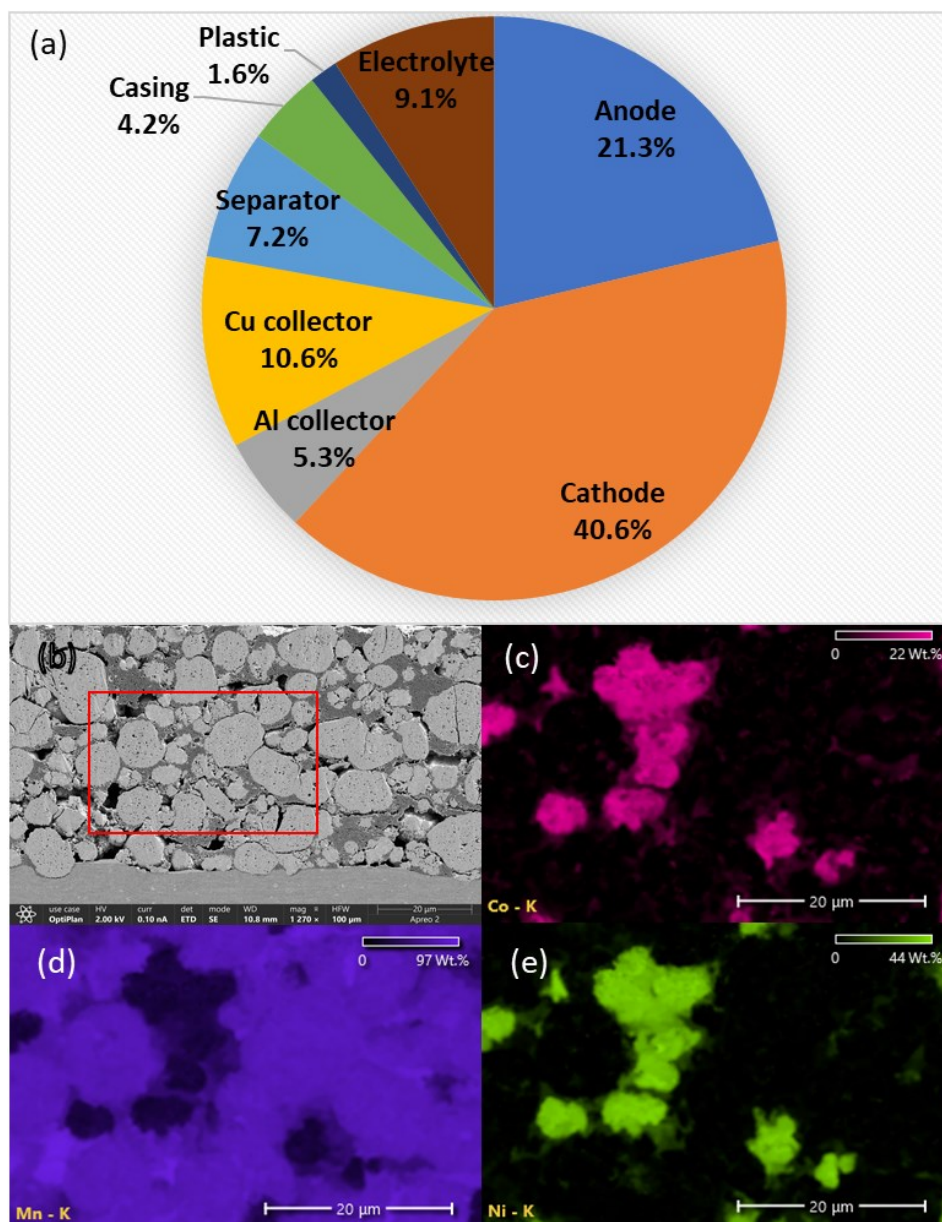
Všechny vzorky byly rozebrány na jednotlivé komponenty a zváženy. Jednotlivé vzorky katod byly podrobeny materiálové analýze za účelem určení materiálu katody. Jak je patrné z Obr. 2a, většinu hmotnosti vzorku č. 1 tvoří elektrodové materiály. Z toho největší část (45,9 %) připadá na katodu, zatímco 5,3 % celkové hmotnosti tvoří hliníkový kolektor. Druhá největší část (31,9 %) odpovídá anodě, zatímco 10,6 % celkové hmotnosti připadá na měděný kolektor. Zbývající téměř čtvrtinu hmotnosti tvoří ostatní součásti, jako je elektrolyt (9,1 %), separátor (7,2 %), plášť (4,2 %) a ostatní plastové díly (1,6 %). Protože nebylo možné za daných podmínek přesně určit množství a složení elektrolytu, byla hmotnost elektrolytu stanovena jako rozdíl mezi celkovou hmotností celé baterie a všech jejích součástí po vysušení. Na základě výpočtu bylo zjištěno, že elektrolyt tvoří přibližně 9,1 % celkové hmotnosti baterie. Následně byly provedeny strukturní a prvkové analýzy (SEM a EDS). Obr. 2b ukazuje strukturu katodového materiálu vzorku č. 1, zatímco obrázky Obr. 2c-e ukazují rozložení vybraných prvků v katodovém materiálu. Z obrázků je patrné, že v katodovém materiálu se vyskytují velká zrna LMO a několik menších zrn NMC. Z EDS analýzy průřezu katodového materiálu vzorku č. 1 vyplývá, že pouze 1,4 % katodového materiálu tvoří kobalt-Co (Obr. 2c), 48,4 % katodového materiálu tvoří mangan-Mn (Obr. 2d) a 4,0 % nikl-Ni (Obr. 2e). Podle analýz se katodový materiál skládá ze směsi LMO a NMC v hmotnostním poměru 90 % LMO a 10 % NMC. Hmotnostní rozložení v katodovém materiálu odpovídá 2,283 g Mn, 0,066 g Co a 0,189 g Ni. Zjištěné materiálové složení katody odpovídá naměřené vybíjecí charakteristice vzorku č. 1.

Podobně byly analyzovány i další vzorky baterií z e-cigaret. Prvkové složení těchto baterií je uvedeno v tabulce Tab. 1.

Tab. 1: Obsah sledovaných prvků ve zkoumaných bateriích.

Baterie	Grafit [g]	Nikl [g]	Mangan [g]	Kobalt [g]	Hliník [g]	Měď [g]	Lithium [g]
Vzorek 1	2,470	0,189	2,283	0,066	0,619	1,234	0,249
Vzorek 2	2,495	0	0	2,783	0,491	1,231	0,258
Vzorek 3	1,791	0,443	0,477	1,194	0,373	0,864	0,171
Vzorek 4	1,827	0,228	0,253	0,661	0,794	0,681	0,091
Vzorek 5	1,654	0,674	0,747	0,459	0,403	0,787	0,163
Vzorek 6	1,819	0,549	0,338	0,896	0,445	0,847	0,172
Průměr	2,009	0,347	0,683	1,010	0,521	0,940	0,184

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 2: (a) Složení článku vzorku č. 1, (b) SEM snímek materiálu katody – pohled v příčném řezu, (c) EDS snímek kobaltu, (d) EDS snímek manganu, (e) EDS snímek niklu.

Shrnutí výsledků

Na základě naměřených údajů bylo zjištěno, že v bateriích pro jednorázové e-cigarety se používají převážně katodové materiály obsahující Co a Ni. Tyto baterie prokázaly schopnost dlouhodobého provozu, přesahující 100 cyklů bez výrazné ztráty kapacity. Vzhledem k tomu, že většina jednorázových e-cigaret končí v komunálním odpadu, dochází k plýtvání cennými a často kritickými surovinami, které může v budoucnu s rostoucí oblibou těchto nikotinových výrobků narůstat.

Převážná většina testovaných baterií obsahovala katodové materiály sestávající ze směsi NMC a LCO. Jedna baterie obsahovala čistý LCO, což z hlediska spotřeby kritických surovin představuje významnější ekologickou zátěž. Naproti tomu jedna z baterií obsahovala katodu složenou výhradně z LMO, který je považován za méně problematický z hlediska životního prostředí a zároveň Mn není klasifikován jako kritická surovina.

Podle našich výpočtů bylo zjištěno, že celkové množství kobaltu, niklu a manganu obsažené v bateriích z jednorázových e-cigaret spotřebovaných v České republice by mohlo kapacitně pokrýt přibližně 84,5 % baterií všech nově registrovaných elektromobilů v ČR v roce 2023.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Poděkování

Tato publikace vznikla za institucionální podpory Ministerstva obrany ČR.

Literatura

- [1] CRM Alliance (2023), Critical Raw Materials, <https://www.crmalliance.eu/critical-raw-materials>.
- [2] European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U. (2020). Study on the EU's list of critical raw materials (2020): final report, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/11619>
- [3] Chatain, B., Critical raw materials: MEPs adopt plans to secure the EU's supply and sovereignty, <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20231208IPR15763/critical-raw-materials-plans-to-secure-the-eu-s-supply>.
- [4] L. Csémy, Z. Dvořáková, A. Fialová, M. Malý, and M. Skývová, thesis, Státní zdravotní ústav, Praha (2024), <https://szu.cz/wp-content/uploads/2024/05/Narodni-vyzkum-uzivani-tabaku-a-alkoholu-v-Ceske-republice-2023.pdf>.
- [5] Česko v datech (2019) <https://www.ceskovdatech.cz/clanek/144-cesko-v-kouri/>.
- [6] Český statistický úřad (2023), <https://csu.gov.cz/docs/107508/9c141fd5-f02b-d9f9-8bed-32d8afc005d1/13006923.pdf>.
- [7] J. Hemolová, Zboží&Prodej, 10, 45-47 (2020).
- [8] V. Mravčík, P. Chomynová, K. Grohmanová, B. Janíková, T. Černíková, Z. Rous, J. Cibulka, E. Franková, B. Nechanská, a H. Fidesová, Zpráva o tabákových, nikotinových a souvisejících výrobcích v České republice 2021.
- [9] The Tobacco Atlas (2022), E-Cigarettes & HTPs, <https://tobaccoatlas.org/challenges/e-cigarettes-https/>.
- [10] K. Vránková, Ecobat (2023), Průzkum: Češi špatně zacházejí s použitými e-cigaretami, <https://www.ecobat.cz/2023/08/10/kam-vyhazujete-elektronicke-cigarety-po-jejich-vykoureni/>.

RECYKLACE LI-ION AKUMULÁTORŮ A JEJÍ PERSPEKTIVY

T. Kazda

Ústav elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká Republika

Abstract

Lithium-ion batteries are the most widespread type of batteries, which are quite essential for a wide range of industries such as automotive and energetics. Batteries themselves are also a separate industry that has expanded rapidly in recent years due to their increased application. However, with increasing production there is also an increase in recycling needs, as the equipment that is produced will have to be recycled years or decades later and waste material is generated alongside the production. Recycling is then also linked to the issues of sustainability and independence from the supply of raw materials for re-manufacturing, which is the reason why it has been focused on in several European legislation adopted in recent years. The current developments and the legislative framework related to the recycling of lithium-ion batteries will be presented in the following text.

Úvod

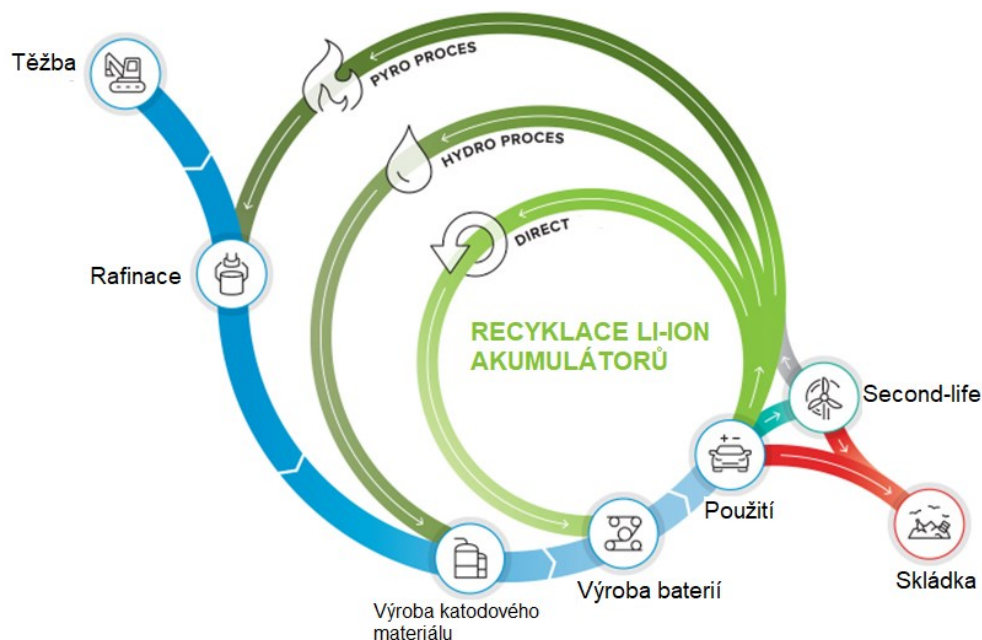
Výroba lithno-iontových (Li-ion) akumulátorů a s ní spojený hodnotový řetězec se v posledních letech velmi rozvinul a můžeme říct, že tento rozvoj je takřka exponenciální a postupně prostupuje jednotlivými patry hodnotového řetězce. Na začátku tak máme klasickou těžbu surovin a následně jejich zpracování, s rostoucími požadavky na výrobu baterií tak dochází k růstu v oblasti těžby a zpracování materiálů a následně se navyšuje výroba materiálů, které se používají pro samotnou výrobu baterií, tedy dochází k nárůstu výroby katodových a anodových materiálů a také elektrolytu atd. Těmito kroky je pak umožněn nárůst produkce samotných Li-ion akumulátorů, které díky nárůstu produkce a poklesu cenu penetrují do nových oblastí průmyslu a opětovně roste poptávka po nových akumulátorech. Roste tedy počet aplikací, také mají rozdílnou dobu životnosti od jednotek let až například po 10-20 let. Díky rozdílné době životnosti a posunu v uvedení nových aplikací na trh nastupuje poslední část hodnotového řetězce tedy recyklace až s jistým zpožděním. V případě recyklace tak můžeme říci, že okamžik, kdy je baterie vyrobena a okamžik, kdy je recyklována, může být vzdálen přibližně 10 let. Rostoucí výroba Li-ion akumulátorů tak sebou přináší jistotu potřeby navýšení kapacit recyklačních firem v následujících letech a desetiletích, tak abychom byly schopni již dnes uváděné baterie na trh v budoucnu recyklovat. Dle statistik víme že velikost produkce Li-ion akumulátorů celosvětově dosahovala v roce 2000 celkem 2 GWh, v roce 2010 tato produkce dosahovala 24 GWh, v roce 2020 již 250 GWh a v roce 2024 takřka 1200 GWh. Do roku 2030 se předpokládá že celosvětová produkce Li-ion akumulátorů přesáhne 4000 GWh. [1] Stejně tak jak narůstá produkce budou muset být navýšeny i celosvětové recyklační kapacity.

Recyklační kapacity a legislativa

Recyklace Li-ion akumulátorů je stejně jako v případě výroby baterií složitý a komplexní proces především pokud je cílem recyklace dosáhnout vysoké účinnosti. Recyklační procesy pak můžeme dělit na tři základní kategorie pyrometalurgický, hydrometalurgický a přímý. Každý z těchto procesů produkuje jiný typ výstupů, které se dají uplatnit v odlišných částech výrobního řetězce a současně tyto procesy dosahuje různé efektivity. Porovnání těchto procesů a využití jejich výstupů v různých částech výrobního řetězce je zobrazeno na Obr. č.1. Tyto procesy pak ještě můžeme rozdělit na dva kroky. Prvním z nich je předúprava, která nejčastěji obnáší demontáž z větších celků, třídění baterií dle typů, vybíjení a drcení. Přičemž u jednotlivých procesů jsou tyto před úpravní kroky rozličné a mohou být více komplexní. V případě hydrometalurgického procesu se tak rozdrčené materiály ještě dále třídí na hliníkové a měděné folie, zbytky polymerů a black mass, což je směsice anodového a katodového materiálu, která se dále zpracovává pomocí hydrometalurgie. Druhým krokem jsou již samotné recyklační procesy. V případě pyrometalurgického procesu jsou veškeré baterie spáleny a při vysokých teplotách jsou získány určité typy zájmových kovů jako je Co nebo Ni. Tato metoda dosahuje nižší efektivity okolo 50 %. Výhodou pak je že pakliže se zpracovatel primárně zaměří na Ni může současně s Li-ion akumulátory s obsahem Ni recyklovat také starší typy akumulátorů jako jsou NiMH. Výstupy jsou obecně nižší kvality a nedají se do další výroby použít bez následného zpracování. Kvalita materiálu tak odpovídá kvalitě materiálu získaných po těžbě. V případě hydrometalurgické metody musí být akumulátory tříděny velmi přesně podle složení katodových materiálů, jelikož nejvyšší efektivity procesu se dosahuje, pokud je přesně nastaven na daný typ katodového materiálu. Tento proces je tedy složitější, avšak materiály nenezpracovávají při vysoké teplotě, ale pomocí nejčastěji kyselinového loužení a výstupní materiál dosahuje vysoké čistoty, díky čemuž může být použit přímo na výrobu nových katodových materiálů. Účinnost tohoto procesu je také výrazně vyšší a může se pohybovat okolo 85 %. Posledním procesem

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

je pak recyklace přímá, která je opětovně ještě více náročná na předúpravu a baterie je tak nezbytně rozebrat včetně jejich obalu tak, aby nebyly poškozeny elektrody a ty následně musí být separovány a samostatně zpracovávána. Výstupem jsou pak jednotlivé části akumulátoru a aktivní materiály anody a katody, které mohou být po další úpravě použity přímo do výroby nových Li-ion akumulátorů. Účinnost tohoto procesu pak přesahuje 90 %. V současnosti tento proces není aplikován v praxi a je fází experimentálního vývoje.



Obr. 1: Porovnání recyklačních procesů. [2]

Recyklační kapacity byly v předchozích letech vytvářeny především v místech, kde se nacházela výroba samotných Li-ion akumulátorů, tedy v Asii ve státech jako je Japonsko, Jižní Korea a Čína. To plynulo z potřeby recyklace výrobního odpadu jelikož, ten se v rámci řetězce objevuje nejdříve a jeho množství opětovně narůstá s rostoucí kapacitou produkce akumulátorů. V současnosti největším zdrojem materiálu k recyklaci tak stále nejsou baterie s ukončenou životností, ale odpad z výroby. [3] Z tohoto důvodu jsou recyklační kapacity v EU poněkud omezeny, ale jejich rozvoj je v současnosti kladen důraz a to současně i s přihlédnutím k co nejvyšší účinnosti. Nově schválená legislativa zaměřená na recyklaci Li-ion akumulátorů tak stanovuje postupné zvyšování účinnosti recyklace Li-ion akumulátorů jako celku a současně stanovuje účinnost recyklace i pro definované materiály. Výsledná recyklační účinnost na by tak měla činit nejméně 70 % od roku 2031 a současně účinnost recyklace pro Co, Ni a Cu by měla dosahovat nejméně 95 % od roku 2032 a pro Li 80 %. [4] V loňském roce také vstoupil v platnost EU Critical Raw Materials Act, který definuje kritické a strategické materiály mezi něj patří materiály používané v Li-ion akumulátorech jako jsou kromě výše jmenovaných například Al, grafit, Mn, Si. Jedním z cílů této směrnice je, aby došlo k navýšení recyklačních kapacit tak, aby bylo možné pokrýt spotřebu těchto materiálů v rámci EU minimálně z 25 % a tím se zvýšila nezávislost na dodavateli těchto materiálů ze zahraničí. [5]

Závěr

Recyklace Li-ion materiálů je velmi komplexní a složitý proces, který sebou přináší, pokud chceme dosáhnout co nejvyšší účinnosti recyklace, značné kapitálové náklady. Z tohoto důvodu se recyklační kapacity od počátku 90. let minulého století rozvíjeli především v Asijských státech, jelikož je bylo možné navázat na výrobní kapacity Li-ion akumulátorů, které potřebovali vyřešit zpracování odpadních materiálů z výroby. V současnosti dochází v rámci EU k rozvoji recyklačních kapacit také v rámci EU. Historicky se zpracováním Li-ion akumulátorů s ukončenou životností zabýval Belgický Umicore, avšak s rozvojem výrobních kapacit Li-ion akumulátorů v EU dochází k rozvoji dalších recyklačních kapacit, přičemž některé z těchto projektů se zaměřují na využití recyklace hydrometalurgické, která umožňuje dosažení vyšších recyklačních účinností tak jak je v budoucnu bude požadovat EU. Kromě samotných evropských firem se recyklací na území zabývají i firmy z Asie které nejčastěji materiály v rámci EU předúpravu a na jejich finální zpracování je odesílají mimo EU. Tento postup pak vede k odlivu strategických materiálů mimo EU. Tomuto odlivu by měla zabránit i nová EU legislativa, která bude omezovat možnosti vývozu těchto materiálů mimo státy EU.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (č. FEKT-S-23-8286).

Literatura

- [1] C. Pillot, The rechargeable battery market and main trends 2020-2030, Open Innovation Regione Lombardi. (2022)
- [2] L. Gaines, Profitable Recycling of Low-Cobalt Lithium-Ion Batteries Will Depend on New Process Developments, One Earth. 1 (2019) 413-415
- [3] Lithium batteries – 1.2m tons ready for recycling by 2030, Pv-Magazine. (2019). <https://www.pv-magazine.com/2019/11/04/lithium-batteries-1-2m-tons-ready-for-recycling-by-2030/>
- [4] REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC, 2023
- [5] Critical Raw Materials Act, European Commission. (2024). https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en

ANALÝZA DAT Z IN-SITU A OPERANDO SEM POZOROVÁNÍ LI-ION BATERIÍ

O. Klvač^{1,2}, D. Trochta^{1,2}, L. Novák² a T. Kazda¹

1 Ústav elektrotechnologie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká Republika

2 Thermo Fisher Scientific Brno, Vlastimila Pecha 12, 627 00, Brno, Česká Republika

Abstract

This study focuses on the development and testing of an electrochemical cell designed for operando analysis in a scanning electron microscope (SEM). The aim is to observe structural changes in active materials in real time during electrochemical cycling. Commercial electrodes based on NMC111, LTO, graphite, and lithium were used, with ionic liquid-based electrolytes containing lithium salts. In-situ SEM observations revealed shrinkage, expansion, and particle cracking during formation cycles. Image analysis software enabled quantification of these effects and correlation with the electrochemical behavior of the cell. The results contribute to a deeper understanding of degradation mechanisms and support the design of more stable lithium-ion batteries.

Úvod

Moderní elektrochemické zdroje proudu musí splňovat kritéria, jako je vysoká hustota uložené energie, dlouhá životnost a stabilita při působení okolních vlivů. Lithium-iontové baterie (Li-ion, LIBs) tyto požadavky splňují, což z nich činí dominantní technologii v oblasti napájení přenosných zařízení i elektromobility. Se zvyšující se poptávkou však rostou i nároky na jejich výkon, bezpečnost, dostupnost a environmentální udržitelnost [1].

V tomto kontextu je patrná snaha o omezení používání kobaltu, jehož těžba je spojena s významnými ekologickými a sociálními dopady. U hojně využívaných katodových materiálů typu NMC (lithium nikl mangan kobalt oxid) je proto kobalt nahrazován niklem, který je lépe dostupný a umožňuje optimalizaci elektrochemických vlastností akumulátorů. Paralelně jsou zkoumány i alternativní materiály, jako je síra, vysokonapěťové spinely či křemíkové anody [2–5].

Ačkoli jsou tyto zmíněné systémy známé již delší dobu, stále naráží na problémy s dlouhodobou stabilitou a řízením degradačních procesů. Pro vývoj bezpečných a spolehlivých systémů je proto zásadní pochopit degradační mechanismy studovat je a najít způsob, jak jim předcházet. K tomu se hojně využívá skenovací elektronová mikroskopie (SEM) s doplňkovými analytickými metodami, jako je energiově disperzní rentgenová spektroskopie (EDS) [4–7].

Metody in-situ a operando SEM poskytují unikátní pohled na kinetiku a mechanismy probíhající uvnitř elektrody v reálném čase, čímž výrazně převyšují informační potenciál ex-situ nebo post-mortem přístupů. Umožňují zachytit konkrétní okamžik, kdy dochází k významné změně ve struktuře či chemickém složení, a tím lépe porozumět příčinám těchto jevů [8,9].

Na druhou stranu, in-situ/operando SEM analýza je technicky náročná kvůli nutnosti vysokého vakua, které omezuje studium za reálných podmínek. Především užití klasických kapalných elektrolytů je omezené z důvodu vysoké volatility a vyžaduje speciální držáky a přípravu vzorků. V praxi se tak často nahrazují iontovými kapalinami s nízkou tenzí par. Těž může být nutné např. zahřívání nebo mechanické stlačení článku definovanou silou. Elektronový svazek může ovlivnit samotný vzorek a měření, a taktéž má SEM omezenou chemickou citlivost, zejména při sledování lehkých prvků. Tyto faktory společně činí in-situ analýzu náročnou jak technicky, tak interpretačně [10,11].

Tato práce se zaměřuje na návrh a přípravu elektrochemického článku vhodného pro operando SEM analýzu, přičemž důraz je kladen na konstrukční řešení článku, výběr materiálů a optimalizaci experimentálních podmínek. Klíčovým cílem je zpracování, vyhodnocení a interpretace dat získaných během cyklování článku v reálném čase s cílem objasnit degradační mechanismy. Výsledky této studie mohou přispět k vývoji stabilnějších a bezpečnějších bateriových systémů.

Experiment

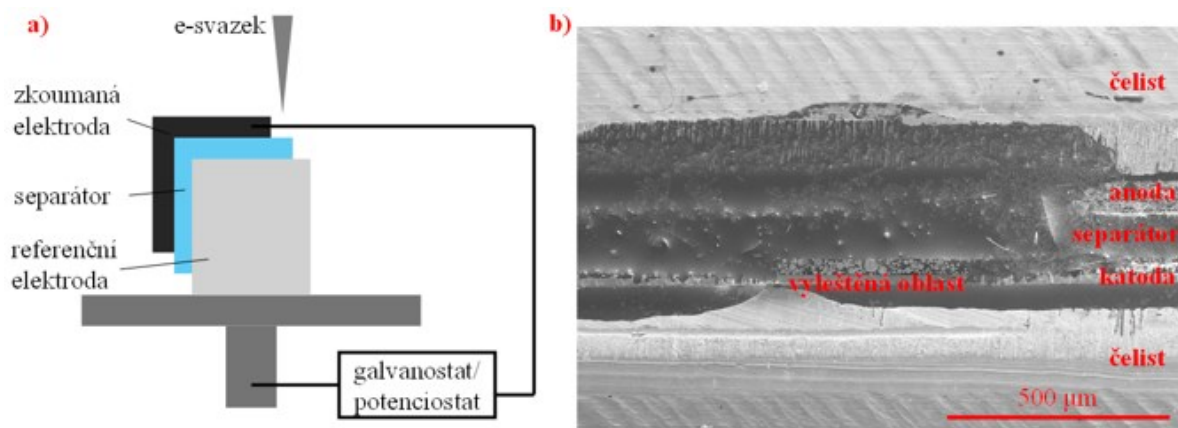
V rámci práce byly využívány komerčně dostupné elektrody (CustomCells). Jednalo se o elektrody s aktivním materiálem NMC111, LTO (lithium titan oxid) a grafit (Gr) s plošnou kapacitou 1 mAh/cm². Taktéž bylo testováno kovové lithium (Li). Z elektrod byly vystřiženy kusy přibližně 5x8 mm. U investigovaných elektrod

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

byl poté připraven řez užitím Thermo Scientific CleanMill polisher iontové leštičky (BIB – broad ion beam technologie).

Elektrody spolu se separátorem byly poté zarovnány ve speciálním držáku navrženém pro operando experimenty a zmáčkuty. Jako separátor byla využita skelná tkanina (Whatmann GF/C). Holder byl poté přesunut do gloveboxu s argonovou atmosférou a pipetou byl aplikován elektrolyt. Pro systémy NMC–LTO byla použita směs 1-methyl-1-propylpyrrolidinium bis(trifluoromethylsulfonyl)imid (Pyr₁₃–TFSI) a LiTFSI v koncentraci 0,5 M. Pro systémy Li–Gr byla využita směs LiTFSI a 1-propyl-1-methylpyrrolidinium bis(fluorosulfonyl)imid (PYR₁₃FSI) v molárním poměru 1:9.

Po kompletaci byl článek přenesen pomocí systému CleanConnect (inertní přenos) do komory SEM, kde byl připojen k potenciostatu Biologic SP200. Před měřením byly provedeny dva formační cykly proudem 0,1 C, v potenciálovém okně 1,3–2,8 V (pro NMC–LTO) a 0,01–2,50 V (pro Li–Gr). Následné měřicí protokoly se lišily dle konkrétního experimentu. Experimentální schéma je znázorněno na obr. 1a, snímek celého článku pak na obr. 1b.



Obr. 1: Experimentální uspořádání experimentu v komoře SEM (a); SEM snímek zkoumaného článku (b).

Shrnutí výsledků

Během formačních cyklů bylo u částic NMC a grafitu pozorováno opakované smršťování a expanze, což vedlo ke vzniku trhlin. Byly rovněž zaznamenány objemové změny na úrovni celé elektrody. Ukázalo se, že praskání částic NMC je nejvýraznější během prvního formačního cyklu. Kromě de/lithiace aktivního materiálu se na objemových změnách podílejí také vlastnosti pojiva a porozita elektrody.

K vyhodnocení těchto jevů byly využity různé softwarové nástroje. Pro analýzu expanze částic byl použit software Phenom ParticleMetric, pro sledování trhlin a objemových změn v širších oblastech pak Avizo. Dále byly využity vlastní Python skripty využívající veřejně dostupné knihovny. Kvantifikovaná data byla korelována s elektrochemickými záznamy a byly identifikovány souvislosti mezi mírou lithiace, napětím, objemovými změnami a vznikem degradace, především ve formě praskání částic.

Poděkování

Tato práce je podporovaná grantem č. FEKT-S-23-8286 Vysokého učení technického v Brně. Práce je vyvíjena ve spolupráci s Thermo Fisher Scientific Brno.

Literatura

- [1] V. Etacheri, R. Marom, R. Elazari, G. Salitra, and D. Aurbach, *Energy & Environmental Science*, 4 (2011)
- [2] Y. Liang et al., *InfoMat*, 1, 6-32 (2019)
- [3] H. -J. Kim et al., *Electronics*, 9 (2020)
- [4] G. Q. Liu et al., *Journal of Solid State Electrochemistry*, 14, 2191-2202 (2010)
- [5] M. Rana et al., *Energy Storage Materials*, 18, 289-310 (2019)
- [6] C. D. Rahn, *Battery systems engineering*, John Wiley & Sons Ltd., Publication, Chichester, West Sussex, United Kingdom, (2013)
- [7] C. Lin et al., *Journal of Chemistry*, 2015, 1-11 (2015)
- [8] H. Yang et al., *Materials Today*, 57, 279-294 (2022)
- [9] D. Liu et al., *Advanced Materials*, 31 (2019)
- [10] P. P. R. M. L. Harks, F. M. Mulder, and P. H. L. Notten, *Journal of Power Sources*, 288, 92-105 (2015)
- [11] S. -M. Bak, Z. Shadike, R. Lin, X. Yu, and X. -Q. Yang, *NPG Asia Materials*, 10, 563-580 (2018)

SODÍKO-IONTOVÉ BATERIE JAKO VHODNÁ ALTERNATIVA PRO NÍZKÉ TEPLOTY?

J. Kasper, J. Kočí, K. Nováková, T. Finsterle, P. Hrzina a V. Knap

Katedra elektrotechnologie, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení v Praze, Česká republika

Abstract

Sodium-ion batteries (SIBs) have recently gained attention as a promising alternative to lithium-ion batteries (LIBs), particularly under low-temperature conditions where LIB performance is known to drop significantly. This study investigates the discharge and pulse performance of commercial SIB cells, specifically high-energy (HE) and high-power (HP) variants, in comparison with several types of LIBs, including LFP, LTO, and NMC cells. The experiments were conducted in a temperature-controlled environment at 25 °C, 0 °C, and -10 °C. Results show that NMC LIBs maintain the highest energy output even at -10 °C. LTO cells demonstrated the most stable thermal behavior across all conditions but delivered lower energy due to their inherently low nominal voltage. Among SIBs, the HE cell exhibited higher capacity but suffered from higher internal resistance. Notably, the HP SIB cell achieved the highest available power in the pulse tests across all temperatures, rivaling the high-energy NMC LIB. Despite this, none of the SIBs outperformed LFP LIBs in terms of energy output within the tested temperature range. Preliminary extrapolation suggests that under even lower temperatures, HP SIBs may become more competitive with LIBs, particularly LFP. These findings support the continued investigation of SIBs for low-temperature applications.

Úvod

Lithium-iontové baterie (LIB) v současnosti dominují oblasti elektrochemického ukládání energie díky své vysoké energetické hustotě a dlouhé životnosti. Jsou široce využívány od přenosné elektroniky přes elektromobily až po velkokapacitní úložiště v energetice. Je však dobře známo, že jejich výkonnost při nízkých teplotách výrazně klesá, zejména v důsledku zpomaleného přenosu náboje a difuze iontů, které vedou k výraznému nárůstu vnitřního odporu. Běžně používaný komerční elektrolyt (LiPF_6 rozpuštěný v ethylénkarbonátu (EC) a ethylmethylkarbonátu (EMC)) navíc začíná při teplotách pod -30 °C částečně tuhnout, což dále omezuje iontovou vodivost. Nabíjení LIB za těchto podmínek vede k usazování kovového lithia na anodě (tzv. *lithium plating*), což urychluje degradaci článku a může vést až k vnitřnímu zkratu v důsledku prorůstání dendritů skrz separátor [1]. Tyto limity významně omezují efektivní využití LIB v chladném prostředí a motivují hledání vhodných alternativ.

Jedním z perspektivních kandidátů jsou sodíko-iontové baterie (SIB), které využívají mnohem dostupnější sodík namísto lithia. Díky hojnosti sodíku a možnosti použít hliník místo mědi jako sběrače proudu na anodě se očekávají nižší materiálové náklady a menší závislost na kritických surovinách [2]. Kromě materiálových výhod vykazují sodíko-iontové baterie potenciálně příznivější elektrochemické chování v nízkoteplotních podmínkách. Vzhledem k většímu iontovému poloměru sodíku probíhá jeho desolvační proces u elektrody snadněji než u lithia, což může přispět k rychlejší reakční kinetice při nabíjení a vybíjení. Tyto vlastnosti činí sodíko-iontové články atraktivní volbou pro aplikace v prostředích s nízkou teplotou, a motivují tak intenzivní výzkum jejich chování a optimalizace právě v těchto podmínkách [3].

Charakterizace a porovnání komerčních SIB s lithium-železo-fosfátovou (LFP) LIB pro kladné teploty bylo již představeno v práci M. Rehm et al. [4], kde jejich proudové a impedanční charakteristiky byly hodnoceny. Obě zkoumané SIB, vysokoenergetická (VE) a vysokovýkonová (VV), prakticky nepřekonal parametry představené LFP LIB v žádném ohledu, kromě proudových zatížitelností pro VV SIB. Nicméně teoreticky mají SIB výhodu při nízkých teplotách, kde by jejich využití mohlo být výhodnější. Tento příspěvek si proto klade za cíl prozkoumat a porovnat SIB pro nízkoteplotní aplikace se současnými LIB.

Experiment

Experiment byl proveden za využití bateriových testerů Neware BTS4000-5V12A. Během testů byly bateriové články uloženy v teplotně řízeném prostředí v komorách Weiss WT3 600/70 a Memmert ICP260+. Přehled testovaných článků cylindrického formátu 18650 je zobrazen v Tab. 1. Pro každý test byly použity dva články stejného typu, prezentována je průměrná hodnota jejich měření a jejich individuální naměřené hodnoty jsou v grafech indikovány chybovými úsečkami.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tab. 1: Testované bateriové články a jejich jmenovité hodnoty.

Typ akumulátoru	Specifikace	Jmenovitá kapacita (Ah)	Jmenovité napětí (V)	Maximální vybíjecí proud (A) [†]
Sodíko-iontový (NIB)	Vysokoenergetická (VE)	1,5	3,1	4,5
Sodíko-iontový (NIB)	Vysokovýkonová (VV)	1,3	3,0	12,0
Lithium-iontový (LIB)	Lithium nikl mangan kobalt (NMC) ^{††}	3,5	3,6	5,4
Lithium-iontový (LIB)	Lithium železo fosfát (LFP)	1,8	3,2	10,0
Lithium-iontový (LIB)	Lithium titan oxid (LTO)	1,3	2,4	12,0

[†] Dle technického listu nebo limitů bateriového testeru.

^{††} Vysokoenergetický typ.

Před vlastním testem, každý článek prošel tzv. předkondicionačním testem, jež zahrnoval pět nabíjecích a vybíjecích cyklů jmenovitými proudy pro „probuzení“ článku a stabilizaci jeho elektrochemického výkonu.

Dále byly provedeny kapacitní testy, kdy článek byl vždy nejdříve kalibrovaně nabit při 25 °C režimem konstantního proudu a konstantního napětí (CC-CV) do jejich náležitých napěťových limitů konstantním proudem 0,5 C a dokud proud během konstantního napětí nedosáhl C/30. Následně byl článek vybit při cílové teplotě (tj. 25, 0, nebo -10 °C) vybraným konstantním proudem 0,3; 1; 1,7; 2,4 a 3 C.

Pro výkonovou a pulzní charakterizaci článků bylo vždy provedeno stejné kalibrované nabití a testy byly aplikovány pro stejné teploty. Konkrétní procedura se skládala z aplikování *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPPC) [5] sekvence a následné změně stavu nabití (SOC) vybitím proudem 0,1 C, po němž následovala relaxace v délce 30 minut. HPPC bylo provedeno pro tyto hodnoty SOC: 100, 95, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 5, 0 %. Konkrétně se HPPC skládalo ze dvou částí, nízko proudové, využívající 0,3 C proudy a vysokovýkonové, aplikující maximální vybíjecí a nabíjecí proudy dle technického listu. Pulzní sekvence zahrnovala 18 s vybití, 40 s pauzu, 10 s nabití a 40 s pauzu. Mezi těmito dvěma HPPC částmi byla pětiminutová relaxace pro stabilizaci.

Shrnutí výsledků

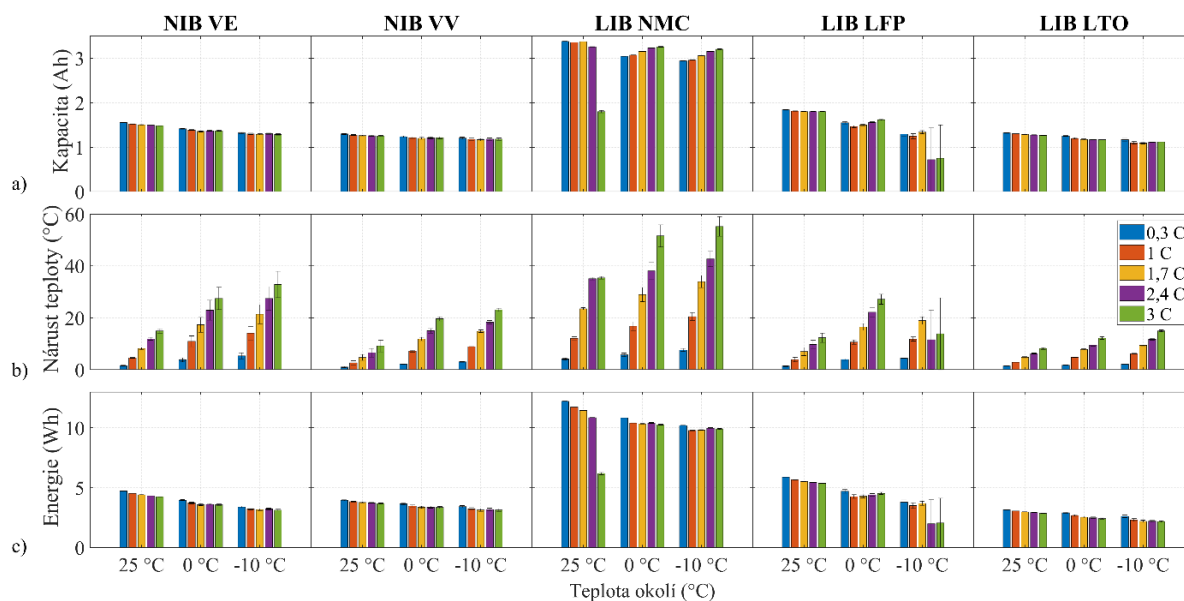
Naměřené hodnoty kapacit a energií během testů jsou zobrazeny na Obr. 1. NMC, jakožto technologie s nejvyšší energetickou hustotou, převyšuje ostatní porovnávané technologie 2 až 3 krát a do -10 °C se zatím neprojevuje negativní vliv nízké teploty pro vybíjení. Ovšem bylo pozorováno, viz. Obr. 1b), že během vybíjení dochází ke značnému ohřevu samotného článku a v případě 3 C vybíjení ve 25 °C bylo dokonce vybíjení limitováno dosaženou teplotou na povrchu (60 °C) místo limitu vybíjecího napětí, což také negativně ovlivnilo dosaženou vybitou kapacitu.

Zkoumané sodíkové články vykazují obecné trendy dle očekávání. VE článek má vyšší kapacitu než VV, avšak vyšší vnitřní odpor působí vyšší ohřev a vyšší omezení při nižších teplotách. U LFP článků jeden z dvojice nebyl schopen řádného vybíjení vyššími proudy při -10 °C. Při opětovném nabití a vybití při 25 °C je plně funkční, a tudíž se dá předpokládat, že s ohledem na vybíjecí podmínky a výrobní tolerance je toto limit pro tento konkrétní typ článků, kde se snižuje jejich spolehlivost a funkčnost. LTO články v testovaných podmínkách vykazaly značnou stabilitu a měly nejnižší oteplení. Ačkoliv jsou kapacitně porovnatelné s NIB a LIB LFP, kvůli jejich nižšímu napětí, jejich dosažitelná energie je výrazně nižší.

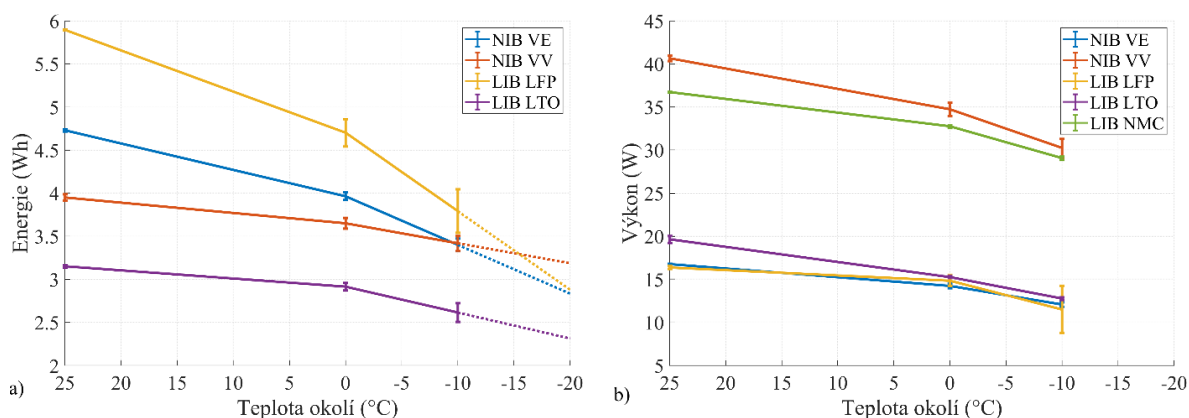
V detailním porovnání dodané energie při vybití 0,3 C, které kvůli nejnižšímu oteplení článků je také nejreprezentativnější pro nastavenou teplotu okolí testu, je z Obr. 2 a) vidět, že pro vybrané teploty, žádný z NIB nepřekonal LFP články. Pokud využijeme lineární extrapolaci trendu v nízkých teplotách, která očekávatelně nebude přesná, nicméně může dobře posloužit pro orientační odhad dalšího vývoje, tak se dá předpokládat, že při nižších teplotách okolo -20 °C, NIB VV na tom bude srovnatelně, ne-li lépe než LFP.

Dále byl analyzován maximální dostupný výkon při dané teplotě na 100 % SOC při 18-sekundovém pulzu. Porovnání je zobrazeno na Obr. 2 b). Zde již NIB VV vykazuje nejvyšší hodnoty napříč teplotami, které jsou obdobné jako má NMC v rozmezí 29-41 W. Je třeba zdůraznit, že testovaný NMC článek je typu vysokoenergetického a lze očekávat, že vysokovýkonové NMC bude značně přesahovat obě technologie. Zbýlé typy článků jako NIB VE, LIB LFP a LTO se výkonově pohybují v obdobném rozmezí 9-20 W, přičemž zde LTO dosahuje mírně vyšších hodnot.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 1: Porovnání naměřených a) kapacit, b) teplotních nárůstu a c) energie pro měřené články.



Obr. 2: a) Dosažená energie vybitím 0,3 C pro vybrané technologie a b) maximální dostupný výkon při 100 % SOC v rámci 18-sekundového pulzu.

Ve zkoumaném intervalu teplot tedy NIB nevykazovali odlišné, či lepší vlastnosti než LIB a je vhodné pokračovat ve zkoumání k nižším teplotám, kde by se očekávaný rozdíl mohl projevit. Především, kromě vybíjení, je nutno také zahrnout nabíjení při nízkých teplotách, které je značným omezením pro většinu LIB. Ohledně výkonových aplikací, VV NIB by mohly být zajímavou alternativou. Pro řádné zhodnocení užití je také nutno zohlednit životnost baterií a jejich ekonomickou stránku.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory projektu „Konverze a skladování energie“, reg. č.: CZ.02.01.01/00/22_008/0004617, financovaného z OP JAK v rámci výzvy Špičkový výzkum a grantu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS24/136/OHK3/3T/13.

Literatura

- [1] G. Zhu et al., “Materials insights into low-temperature performances of lithium-ion batteries,” *J Power Sources*, vol. 300, pp. 29–40, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.09.056.
- [2] C. Vaalma, D. Buchholz, M. Weil, and S. Passerini, “A cost and resource analysis of sodium-ion batteries,” *Nat Rev Mater*, vol. 3, no. 4, p. 18013, Mar. 2018, doi: 10.1038/natrevmats.2018.13.
- [3] M. Li et al., “Low-temperature performance of Na-ion batteries,” *Carbon Energy*, vol. 6, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.1002/cey2.546.
- [4] M. Rehm, M. Fischer, M. R. Gomez, M. Schütte, D. U. Sauer, and A. Jossen, “Comparing the electrical performance of commercial sodium-ion and lithium-iron-phosphate batteries,” *J Power Sources*, vol. 633, p. 236290, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jpowsour.2025.236290.
- [5] U.S. Department of Energy, “PNGV Battery Test Manual,” DOE/ID-10597, Rev. 3, Feb. 2001.

DYNAMIKA TEPLOTNÍCH ZMĚN PŘI OPAKOVANÉM OCHLAZOVÁNÍ A OHŘEVU OLOVĚNÉHO AKUMULÁTORU

P. Křivík

Ústav elektrotechnologie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká Republika

Abstract

This paper deals with the study of the influence of ambient temperature on the dynamics of temperature changes in a lead-acid battery. For this reason, 3 temperature sensors were placed in the battery under investigation and temperature changes were measured, examining the increase and decrease of temperatures in the internal environment of the battery when the ambient temperature changes.

Úvod

Olověný akumulátor je během provozu často vystaven opakovaným změnám okolní teploty. Aktuální teplota olověného akumulátoru ovlivňuje jeho kapacitu, výkon, vnitřní odpor nebo životnost. Přitom optimální pracovní teplota pro provoz olověných akumulátorů je 20 °C. Nižší teploty způsobují nárůst vnitřního odporu, pokles výkonu a kapacity. Vyšší teploty způsobují pokles vnitřního odporu, a tudíž nárůst výkonu, ale roste také rychlost všech parazitních reakcí, které způsobují pokles životnosti (samovybíjení, koroze, elektrolyza vody během nabíjení). U otevřených systémů dochází ke zvýšenému úbytku vody a obnažování desek. U hermetizovaných systémů roste při nabíjení rychlost kyslíkového cyklu, který způsobuje další dodatečný ohřev baterie.

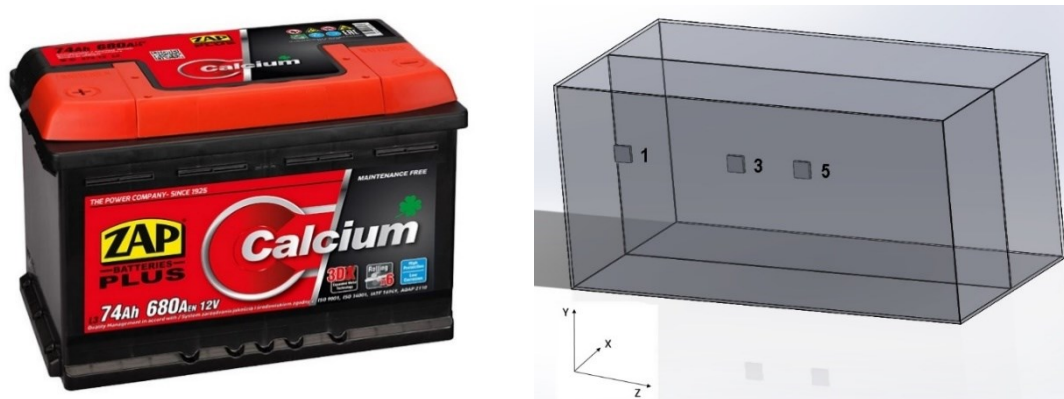
Při změně teploty okolí dochází k největším teplotním změnám přes boční stěny nádoby akumulátoru, které mají kontakt s elektrolytem a deskami. Dno nádoby má větší tloušťku oproti bočním stěnám, horní víko není v kontaktu s elektrolytem a vrstva vzduchu zabraňuje větším změnám teploty díky své nízké tepelné vodivosti).

Experiment

Pro zkoumání dynamiky teplotních změn uvnitř olověného akumulátoru při opakovaných změnách teploty okolí byl použit bezúdržbový 12 V akumulátor ZAP Plus Calcium 74 Ah s rozměry 275 x 175 x 190 mm. Akumulátor je sestavený ze 6 článků zapojených do série uložených do nádoby z ABS plastu, který má zesílené dno kvůli nosnosti. Jednotlivé články jsou odděleny plastovými přepážkami.

Do vertikální roviny YZ procházející středem baterie byly umístěny 3 teplotní čidla Pt100. Z důvodu ochrany před agresivním elektrolytem byla čidla před vložením pokryta vrstvou epoxidové pryskyřice. 1. čidlo bylo umístěno mezi vnějším okrajem desky a plastovou nádobou v oblasti 1. článku (č. 1), 2. čidlo byla umístěna mezi deskou a plastovou přepážkou v oblasti 2. článku (č. 3) blíže středu akumulátoru a poslední 3. čidlo bylo umístěno uprostřed akumulátoru (ve směru osy Z) mezi deskou a plastovou přepážkou v oblasti 3. článku (č. 5).

Z důvodu instalace teplotních čidel bylo nutno odstranit část víka akumulátoru a po instalaci čidel byla tato část nahrazena vrstvou igelitu pro zabránění odparu elektrolytu a omezení teplotních změn v horní části baterie.



Obr. 1 : Olověný akumulátor ZAP Plus 74 Ah 12 V a schéma rozmístění 3 teplotních čidel.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

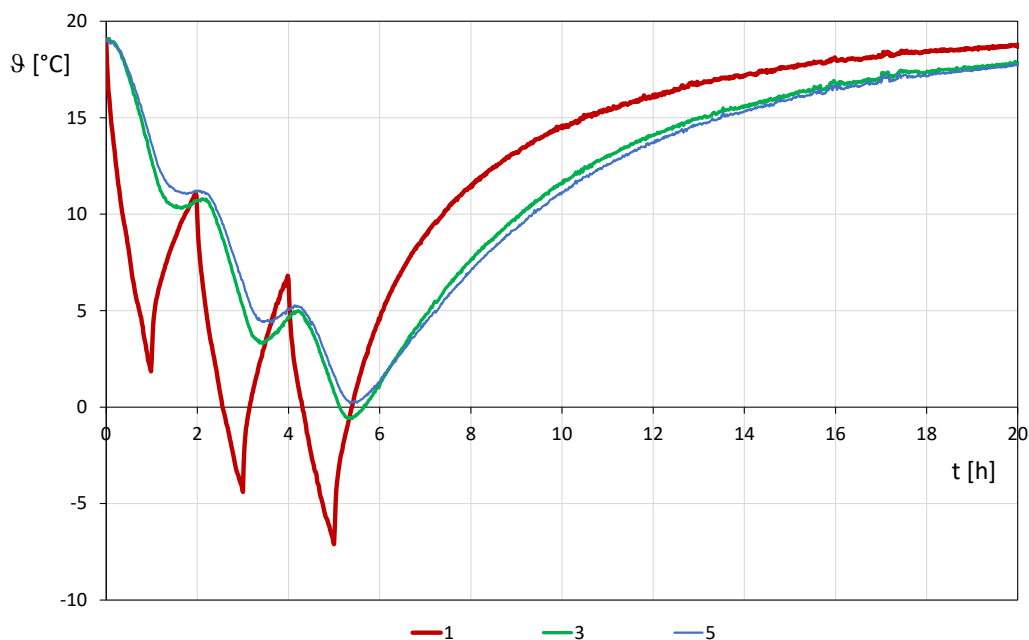
U tohoto akumulátoru byly provedeny v nabitém stavu 2 experimenty s měřením teplotních změn olověného akumulátoru:

1. Opakované ochlazování z 20 °C na -40 °C
2. Opakovaný ohřev z 20 °C na 70 °C

1. Opakované ochlazování z 20 °C na -40 °C

V prvním experimentu byl akumulátor vkládán z pokojové teploty 20 °C do mrazicího boxu temperovaného na -40 °C po dobu 1 h a poté opět přemístěn do pokojové teploty po dobu 1 h. Do mrazicího boxu byl akumulátor takto vložen 3x, poté byl přemístěn do pokojové teploty na dobu 15 h. Během celého experimentu byla v minutových intervalech zaznamenávána teplota všech teplotních čidel.

Na obr. 2 je průběh teplot na 3 čidlech po opakovaném vkládání akumulátoru do mrazicího boxu a zpětném ohřevu na pokojovou teplotu. Je vidět výrazný rozdíl mezi průběhy teplot u čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru oproti průběhům teplot ostatních čidel. U tohoto čidla dochází k nejprudšímu poklesu teploty ihned od 1. minuty až k teplotě 2 °C po hodině ochlazování. U čidel dále od boční stěny dochází k výraznějšímu poklesu teploty teprve po cca 20 minutách. Po přemístění akumulátoru do pokojové teploty dochází u čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru opět k prudkému nárůstu teplot ihned od 1. minuty ohřevu, po 1 hodině ohřevu teplota tohoto čidla dosahuje asi 11,5 °C. U ostatních čidel ještě doznívá ochlazování a teprve po cca 20 minutách ohřevu dochází k zastavení ochlazování. K nárůstu teploty na těchto čidlech během 1 h ohřevu prakticky nedochází vlivem pomalých procesů přenosu tepla do vnitřních oblastí akumulátoru a teplota se ustálí na cca 10,5 °C u čidla č. 3 a na 11,5 °C u čidla č. 5, což je teplota blízká teplotě čidla č. 1 blízko boční stěny nádoby akumulátoru. V dalším kole ochlazování teplota čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru opět prudce klesá až k -4 °C po hodině ochlazování. U ostatních čidel je průběh ochlazování podobný jako v 1. kole, teplota na konci 2. ochlazování se pohybuje okolo 5 °C u čidla č. 5 a 4 °C u čidla č. 3. Při následujícím ohřevu teplota čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru prudce stoupne na 7 °C na konci ohřevu. U ostatních čidel opět v prvních 20 minutách doznívá ochlazování vystřídané mírným nárůstem teploty na cca 5 °C na konci ohřevu u obou čidel. To je rozdíl oproti 1. kolu ohřevu, kde k nárůstu teploty téměř nedošlo vlivem menšího rozdílu mezi teplotou okolí a teplotou čidel. Větší teplotní gradient ve 2. kole ohřevu vedl k větším teplotním změnám všech čidel. Tento trend potvrdilo i 3. kolo ochlazování a ohřevu. Po konci 3. kola ochlazování teplota čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru dosáhla -7 °C. Teplota ostatních čidel dosáhla minimální hodnoty okolo 0 °C po cca 20 minutách ohřevu následujícího po 3. kole ochlazování. Ve zbývajících asi 15 hodinách byl akumulátor přemístěn opět do pokojové teploty a teploty všech čidel postupně logaritmičsky rostou ke 20 °C.



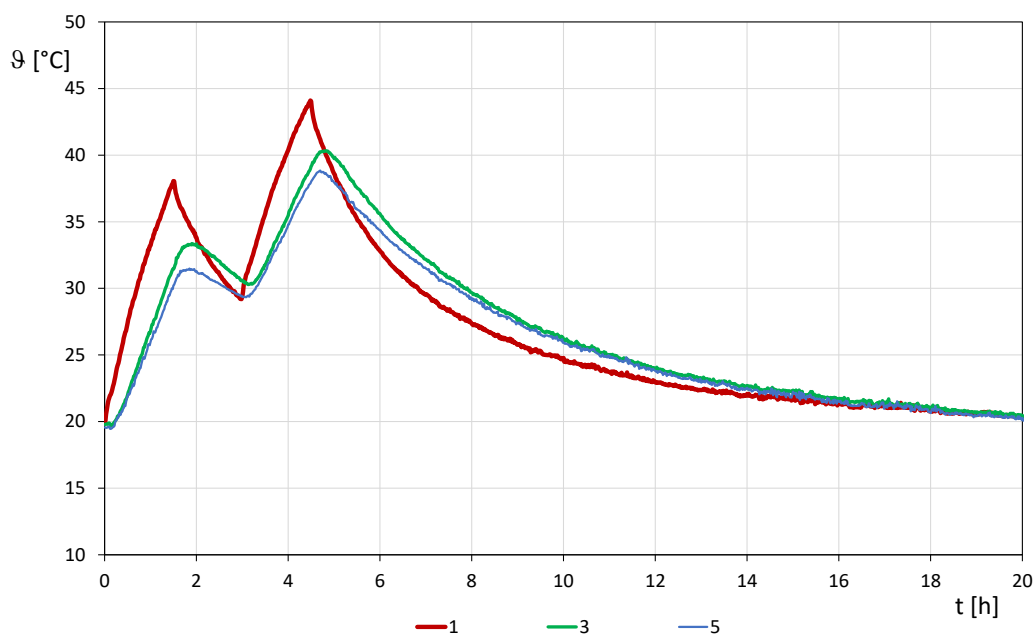
Obr. 2: Průběh teplot 3 měřených míst v olověném akumulátoru během opakovaného 1 h ochlazování z 20 °C na -40 °C a zpětného 1 h ohřevu na pokojovou teplotu 20 °C.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

2. Opakovaný ohřev z 20 °C na 70 °C

Ve druhém experimentu byl akumulátor vkládán z pokojové teploty 20 °C do teplotní komory temperované na 70 °C po dobu 1,5 h a poté opět přemístěn do pokojové teploty po dobu 1,5 h. Do teplotní komory byl akumulátor takto vložen 2x, poté byl přemístěn do pokojové teploty na dobu 15 h. Během celého experimentu byla v minutových intervalech zaznamenávána teplota všech teplotních čidel.

Na obr. 3 je průběh teplot na 3 čidlech po opakovaném vkládání akumulátoru do teplotní komory a zpětném ochlazování na pokojovou teplotu. Je vidět výrazný rozdíl mezi průběhy teplot u čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru oproti průběhům teplot ostatních čidel. U tohoto čidla dochází k nejprudšímu nárůstu teplot ihned od 1. minuty až k teplotě 38 °C po 1,5 h ohřevu. U čidel dále od boční stěny dochází k výraznějšímu nárůstu teploty teprve po cca 20 minutách. Po přemístění akumulátoru do pokojové teploty dochází u čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru opět k prudkému poklesu teploty ihned od 1. minuty ochlazování, po 1,5 hodině ochlazování teplota tohoto čidla dosahuje asi 29,3 °C. U ostatních čidel ještě doznívá ohřev a teprve po cca 20 minutách ochlazování dochází k zastavení ohřevu. Na těchto čidlech během 1,5 h ochlazování dochází k poklesu teploty - u čidla 5 na 29,5 °C, což je teplota blízká teplotě čidla č. 1 blízko boční stěny nádoby akumulátoru, u čidla 3 na 30,5 °C. V dalším kole ohřevu teplota čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru opět prudce roste až k 44 °C po 1,5 h ohřevu. U ostatních čidel je průběh ohřevu podobný jako v 1. kole, teplota na konci 2. ohřevu se pohybuje okolo 40 °C u čidla č. 3 a 39 °C u čidla č. 5. Ve zbývajících asi 15 hodinách byl akumulátor přemístěn opět do pokojové teploty a teploty všech čidel postupně exponenciálně klesají ke 20 °C.



Obr. 3: Průběh teplot 3 měřených míst v olověném akumulátoru během opakovaného 1,5 h ohřevu z 20 °C na 70 °C a zpětného 1,5 h ochlazování na pokojovou teplotu 20 °C.

Závěr

Z experimentů je vidět odlišný průběh teplot u čidla blízko boční stěny nádoby akumulátoru oproti průběhu teplot ostatních čidel umístěných uvnitř akumulátoru. V místě kontaktu aktivních hmot s boční stěnou nádoby je také na počátku experimentu vždy největší gradient teploty, což dále zvyšuje rychlost teplotních změn. K nejpomalejším teplotním změnám naopak dochází podle očekávání v těžišti akumulátoru (čidlo 5). U tohoto čidla na začátku ke změně teploty téměř nedochází, teprve po 20 minutách lze pozorovat postupnou změnu teploty s tím, jak se okolní teplota postupně dostává do vnitřních částí baterie a i ve vnitřních oblastech akumulátoru vzrůstá teplotní gradient.

Je vidět, že při změně okolní teploty dochází k nerovnoměrné distribuci teplot aktivních hmot ve vnitřním prostředí akumulátoru. Velké teplotní rozdíly uvnitř akumulátoru způsobují nerovnoměrné vytěžování aktivních hmot během cyklování vlivem rozdílné difúzní rychlosti iontů v elektrolytu a rozdílné vodivosti aktivních hmot jednotlivých desek vlivem jejich rozdílných teplot.

Poděkování

Publikace vznikla za podpory projektu specifického výzkumu na VUT (FEKT-S-23-8286).

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Literatura

- [1] H. A. Kiehne, Battery Technology Handbook, second edition, 2003
- [2] D. Valkovska, M. Dimitrov, T. Todorov, D. Pavlov, Thermal behavior of VRLA battery during closed oxygen cycle operation, Journal of Power Sources 191 (2009), 119–126
- [3] H. Frank Gibbard, Thermal Properties of Battery Systems, Journal of the Electrochemical Society, Volume 125, Issue 3, (1978) 353–358
- [4] D. A. J. Rand, R. Woods, R. M. Dell, Batteries for electric vehicles, 1998

ROČNÁ PREVÁDZKA ENERGETICKÉHO SYSTÉMU S INTELIGENTNÝM RIADENÍM BESS A TEPELNÉHO ČERPADLA ZA ÚČELOM ZNIŽOVANIA SPOTREBY PRIMÁRNYCH ENERGII

J. Kurcz¹, J. Longauer¹ a J. Poničan²

¹ Ústav materiálov a mechaniky strojov, Slovenská akadémia vied

² Ústav materiálov a mechaniky strojov, INOVAL – Inovačné centrum Slovenská akadémia vied

Abstract

The paper addresses the efficient utilization of renewable energy sources in building operation, which is crucial for reducing overall energy consumption, minimizing environmental impact, alleviating stress on the energy infrastructure, and reducing system losses. It evaluates the operation of the energy system of part of the experimental hall at the Institute of Materials and Machine Mechanics of the Slovak Academy of Sciences. The assessed energy system consists of multiple photovoltaic installations with different configurations, thermal batteries, an electrical battery storage system, a water-to-water heat pump connected to ground heat exchangers, and various operational electric and thermal consumers. The aim is to optimize operation and maximize the use of renewable energy sources during building operation. The paper compares and evaluates the annual balances of energy consumption and production under different conditions: without photovoltaic systems, with photovoltaic systems, and with intelligent control of battery energy storage system (BESS) and the heat pump. It also models possible combinations of installed capacities for production and storage systems and proposes a methodology for determining the optimal installed capacity of such systems based on the facility's electricity consumption.

Úvod

Hlavnými piliermi modernej udržateľnej energetiky sú:

- energetická efektívnosť [1]
- nízka uhlíková stopa [2]
- rozvoj obnoviteľných zdrojov energie (ďalej OZE) [3]
- energetická bezpečnosť a stabilita dodávok energie [4]
- sociálna spravodlivosť a dostupnosť energie [5]
- resp. ochrana životného prostredia [6]

Jedine súčasným budovaním jednotlivých pilierov je možné dosiahnuť ambiciózne ciele Európskej únie (ďalej EÚ). Samotným rozvojom intermitentných OZE, okrem pozitívnych účinkov na životné prostredie, sa objavujú aj výzvy pre bezpečnosť a spoľahlivosť energetických systémov [7][8]. Ako každá krajina v Európskej únii, tak aj Slovenská republika (ďalej len SR) uvádza vo svojom Národnom energetickom a klimatickom pláne Ministerstva hospodárstva svoje vizionárske ciele. Počas 7 rokov od 2023 do roku 2030 plánuje zdvojnásobiť inštalovaný výkon z 850 MW na 1 700 MW vo fotovoltických elektrárnach (ďalej FVE), resp. zo 4 MW inštalovaného výkonu veterných elektrární zvýšiť inštalovaný výkon na 750 MW [3].

Od súčasných energetických systémov sa preto vyžaduje úzka spolupráca medzi výrobnými zariadeniami produkujúcimi energiu, prípadne nosičmi a akumuláciou, resp. spotrebičmi energie. Rovnako sa vyžaduje koordinácia chodu rôznych zariadení slúžiacich na premenu energie z jednej formy na inú. Len správne nadimenzovaný a operačne vyladený systém bude efektívne pracovať zmysle udržateľnej prevádzky objektu. V rámci energetickej efektívnosti je nemenej dôležité rozumné využívanie energonosičov na základe ich energetického potenciálu.

K dosiahnutiu vyššej efektívnosti je potrebné energiu s vyšším potenciálom vo viacerých stupňoch „recyklovať“ (napr. vysokoteplotná para z výstupu parnej turbíny sa využije pre ohrev technológie pre spracovanie materiálov a následne sa ešte ďalej môže využiť na vykurovanie alebo ohrev teplej úžitkovej vody, prípadne použije sa ešte ako vstup do tepelného čerpadla).

V systéme Energo Hubu sa v prechodovom období sa na vykurovanie využíva tepelná energia z hybridných FV panelov, resp. počas prvých horúcich dní sa využíva odovzdanie prebytočného tepla priamo do zeme pomocou zemných výmenníkov. Podobne sa odpadové technologické teplo z experimentálnych zariadení primárne využíva vo vykurovacom období na ohrev haly.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Postupným rozvojom systémov v rámci Energo Hubu na Ústave materiálov a mechaniky strojov Slovenskej akadémie vied (ďalej ÚMMS SAV) sa snažíme vyskúmať vhodnú kombináciu energetických zariadení a demonštrovať naše výsledky pre širokú odbornú verejnosť. V rámci aktuálnych možností a dostupných udržateľných zdrojov energií znižujeme spotrebu voči vonkajšej elektrickej a tepelnej sieti.

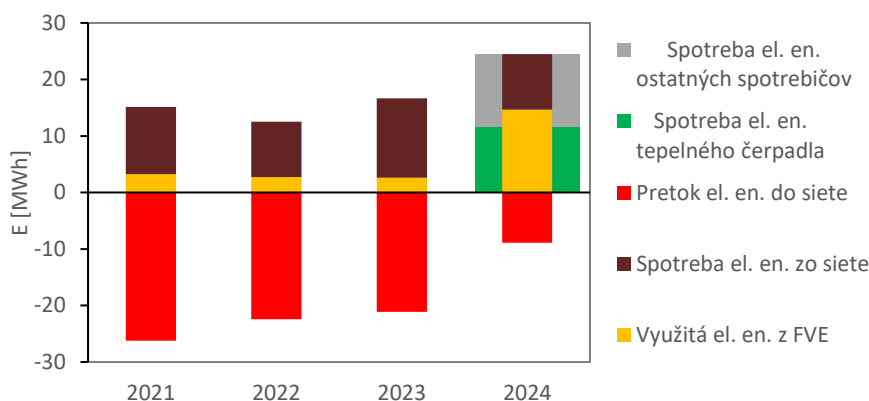
Experiment

Základnými komponentmi Energo Hubu ÚMMS SAV sú nasledovné zariadenia:

- Sieťové FVE 10,5 kWp, FVE 8,7 kWp (od 17.9.2024) a hybridná 15,5 kWp FVE pripojená na LiFePO₄ akumulátory s kapacitou 49,7 kWh a výkonom 20,4 kW.
- Tepelné čerpadlo s elektrickým príkonom 12,5 kWe a tepelným výkonom viac ako 30 kWt.
- Zemné výmenníky dlhé 100 m v počte 4 kusy s 3 8 m³ tepelnými zásobníkmi.
- Stropný vykurovací systém s maximálnym výkonom približne 5 kWt a tepelnými zásobníkmi 0,5 m³, 0,75 m³ a 1 m³ (s vodným akumulačným médium).
- Iné zariadenia ako vzduchový kompresor s výkonom 12,5 kW a vzdušníkom 10 bar a 1 m³, rezačky, frézy a iné menšie elektrické spotrebiče.

Zariadenia boli pôvodne prevádzkované samostatne, čo spôsobovalo vysoký pretok nevyužitej elektrickej energie (ďalej el. en.) do verejnej distribučnej siete v čase dostupnej el. en. z FVE a rovnako zvýšenú spotrebu el. en. počas obdobia bez dostatočného výkonu z FVE. Spoločným riadením komponentov sa dosiahlo vyššie využívanie el. en. z FVE [9].

Primárnou podmienkou prevádzky zariadení bolo pokryť spotrebu el. en. prevádzkových zariadení, pričom spotreba na ďalší deň bola predikovaná poloautomaticky. Na základe toho sa systém poloautomaticky rozhodoval aké množstvo naakumulovanej el. en. nechá v BESS. Následne ďalšou podmienkou bolo spustenie tepelného čerpadla (ďalej TČ) v režime chladenia alebo vykurovania (podľa vonkajšej teploty), pričom časť vyprodukovaného tepla a chladu sa ukladalo v tepelných zásobníkoch.

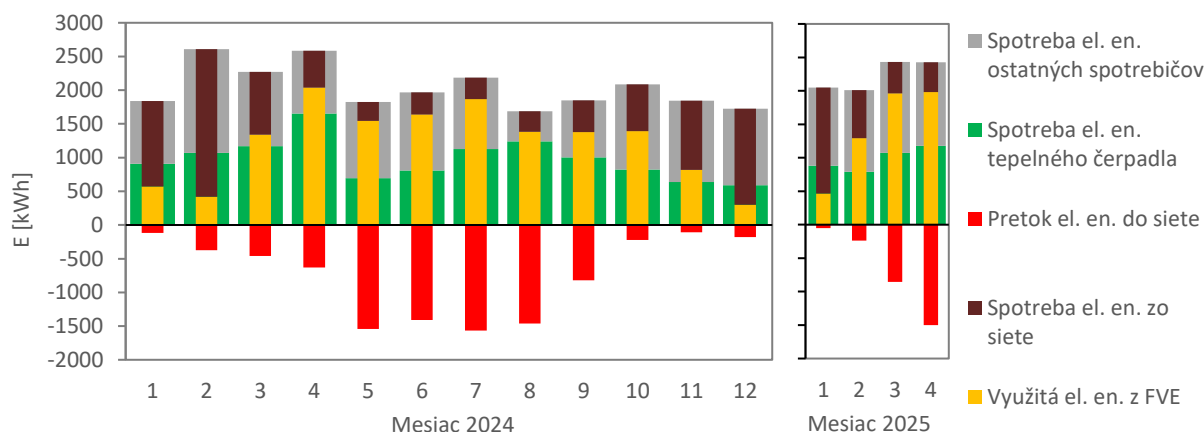


Obr. 1: Ročné bilancie elektrickej energie Energo Hubu ÚMMS SAV v období 2021-2024.

Spotreba el. en. v danom odbernom mieste bola v rokoch 2021-2023 v rozmedzí 12,5-16,7 MWh. Z toho približne priemerne 19,6%¹ bolo pokrytých el. en. vyrobenou z FVE. V roku 2024 sa na mnohé miesta nainštalovali priebehové merania spotreby el. en. a spustila sa riadená prevádzka energetických zariadení. Využitie FVE sa zvýšilo na 62,3% (z približne 10,9%¹) a celková spotreba el. en. z distribučnej siete znížila o 2,1 MWh voči roku 2021, t.j. o 15,2%, resp. sa nezvýšila voči roku 2022 (Obr. 1). Pričom v roku 2024 bolo v prevádzke TČ, ktoré spotrebovalo 11,7 MWh elektrickej energie a vyprodukovalo 13,9 MWh tepla (celková spotreba experimentálnej haly je približne 132 MWh tepla) a 10 MWh chladu na zvýšenie pracovného komfortu zamestnancov. Zvýšená spotreba elektrickej energie v roku 2023 (Obr. 1) bola zapríčinená aj testovacou prevádzkou TČ koncom roka ešte bez koordinovaného spúšťania s FVE.

¹ Údaj určený na základe 3,5 ročnej sumárnej prevádzky FVE počas rokov 2020-2023 bez priebehového merania.

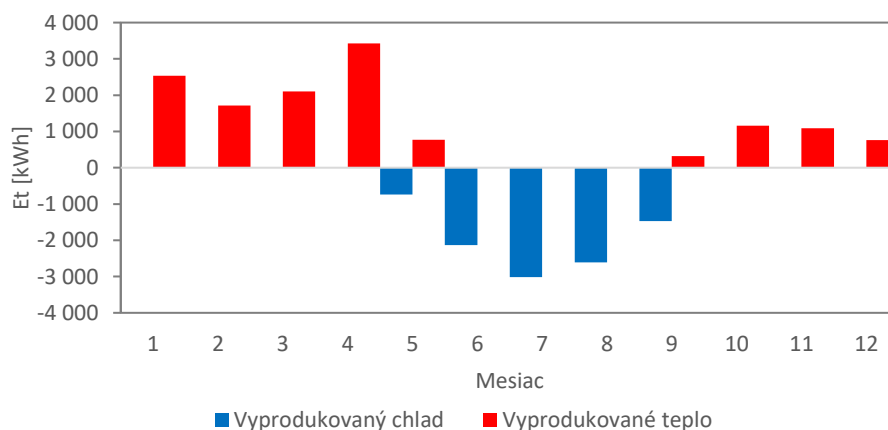
46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 2: Mesačné bilancie elektrickej energie Energo Hubu ÚMMS SAV.

V mesačnom rozlíšení (Obr. 2) je možné pozorovať nasledovné prevádzkové javy:

- V septembri 2024 sa nainštalovala FVE s monokryštalickými modulmi s výkonom 8,5 kWp, t.j. nastalo zvýšenie inštalovaného výkonu o 33,4%. Z toho dôvodu je možné vidieť výrazný nárast vyprodukovanej el. en. v mesiacoch január až apríl v roku 2025 voči rovnakým mesiacom z roku 2024. V tomto období FVE spolu vyrobili o 40,1% el. en. navyše (ožiarenie v týchto mesiacoch bolo o 1,4% nižšie ako v roku 2025).
- V apríli 2024 boli pretoky výrazne nižšie ako v apríli 2025. Bolo to spôsobené zvýšenou spotrebou el. en. TČ, ktoré produkovalo teplo nielen pre vykurovanie, ale hlavne aj na testovanie tepelnej izolácie tepelných akumulátorov pri zvýšenej prevádzkovej teplote (viď aj Obr. 3). Oproti tomu v roku 2025 sa produkované teplo využívalo len na vykurovanie.
- Najvyššiu spotrebu el. en. z verejnej distribučnej siete je možné pozorovať v zimných obdobiach, kedy nie je dostatok el. en. z FVE. Z Obr. 2 je možné vidieť, že spotreba z verejnej distribučnej siete nie je ani v jednom mesiaci nulová (ani v letných, keď je dostatok el. en. z FVE). Je to spôsobené nekoordinovanou prevádzkou ostatných elektrických spotrebičov (technológií) v experimentálnej hale ÚMMS SAV.
- Najväčšie prebytky je možné očakávať hlavne počas prechodných mesiacov (máj, prípadne september), kde nie je potrebné ani vykurovať ani chladieť a v letných mesiacoch z dôvodu nedostatočného výkonu spotrebičov (chladičov) v temperačnom systéme.



Obr. 3: Celková produkcia tepelnej energie (teplo a chlad) tepelným čerpadlom počas roku 2024.

Zhrnutie výsledkov

Jednotlivé objekty v areáli SAV v Bratislave, t.j. aj experimentálna hala ÚMMS SAV, sú zásobované teplom z centrálneho vykurovacieho systému, ktorý zabezpečuje Správa účelových zariadení SAV a finančne zastrešuje Úrad akadémie vied. Z prevádzkového hľadiska to nemotivuje užívateľov a správcov jednotlivých objektov k efektívnemu využívaniu spotrebičov tepla (vykurovanie a ohrev teplej úžitkovej vody). Oproti tomu finančne

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

pokrytie spotreby el. en. jednotlivých objektov si musia zabezpečiť správcovia sami. Práve z tohto dôvodu bola prevádzka TČ počas zimného obdobia v režime vykurovania obmedzovaná len na prebytočnú elektrickú energiu. V letnom období bolo nutné obmedzovať prevádzku tepelného čerpadla z dôvodu maximálneho chladiaceho výkonu koncových zariadení.

Koordinovaným automatizovaným riadením zariadení, ktoré vykazujú určitú mieru flexibility, bolo možné zvýšiť pokrytie spotreby el. en. objektu el. en. z FVE o viac ako 40%. Efektívnym využívaním spotrebičov sa vyprodukovalo pritom ešte 24 MWh tepelnej energie (tepla a chladu) pri takmer nemennej celkovej spotreby el. en. zo siete. Podobne bolo dosiahnuté zvýšenie využitia el. en. z FVE z 10,9% na 62,3%. Ďalšie zvýšenie pokrytia spotreby el. en. z FVE by bolo možné dosiahnuť napr. vyššou koordináciou spúšťania ostatných technologických zariadení (za základe plánu práce počas slnečných dní), ktoré by ale mohlo byť nekomfortné z pohľadu zamestnancov a v niektorých prípadoch ani nerealizovateľné z dôvodu termínov realizácii procesov (objednávky, harmonogram projektov a iné). K efektívnejšiemu využívaniu dostupných zdrojov energií by určite prispela aj inštalácia spotrebiča el. en., ktoré by vedelo spotrebovať energiu nezávisle od experimentálnych činností, pričom by ale poskytovala užitočnú prácu, resp. službu pre prevádzkovateľa (napr. nabíjačka elektromobilov s variabilnou cenou podľa poveternostných podmienok, filtrácia rôznych plynov potrebných pre technologické procesy počas dostupnej el. en. z FVE alebo pripojenie zásobníka na stlačený vzduch do zmienenej energetického systému). Zvýšenie akumulčných kapacít by tiež pozitívne prispelo k lepšiemu využívaniu dostupnej energie z FVE a znížilo spotrebu el. en. z verejnej siete.

Pokrokovú energetiku 20. rokov 21. storočia charakterizuje koordinácia a kooperácia zariadení na základe predikovania podmienok prevádzky (či už spotreby alebo výroby). Každý systém sa vyznačuje určitou jedinečnosťou na strane spotreby a aj na strane výroby energie (elektrickej, tepelnej, chemickej atď.), ktorú je potrebné podrobne navrhnuť a odsimulovať jeho správanie za účelom čo najefektívnejšej činnosti.

PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci programu Obnoviteľná energia pre vytvorenie vyváženého ekologického programu znižovania emisií uhlíka. Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu 09I04-03-V02-00033 a vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Medzinárodné centrum excelentnosti pre výskum inteligentných a bezpečných informačno-komunikačných technológií a systémov – II. etapa, Kód ITMS: 313021W404.

Founded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I04-03-V02-00033.

Literatúra

- [1] SMERNICA EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY 2012/27/EÚ o energetickej efektívnosti, ktorou sa menia a dopĺňajú smernice 2009/125/ES a 2010/30/EÚ a ktorou sa zrušujú smernice 2004/8/ES a 2006/32/ES
- [2] NARIADENIE EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY (EÚ) 2021/1119, ktorým sa stanovuje rámec na dosiahnutie klimatickej neutrality a menia nariadenia (ES) č. 401/2009 a (EÚ) 2018/1999 (európsky právny predpis v oblasti klímy)
- [3] Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky: Aktualizácia integrovaného národného energetického a klimatického plánu na roky 2021 – 2030, online, citované 6.5.2025, dostupné na: <https://www.economy.gov.sk/uploads/files/A65vdZlY.pdf?csrt=4738634539387718696>
- [4] IEA (2022), World Energy Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)
- [5] Energy Poverty Advisory Hub: Energy Poverty Advisory Hub Handbook 3: A Guide to Implementing Energy Poverty Mitigation Actions, 2024, Brussels
- [6] SMERNICA EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY 2011/92/EÚ o posudzovaní vplyvov určitých verejných a súkromných projektov na životné prostredie
- [7] LIŠKA, M. et al. Proposal of the methodology to determine maximum installed power of renewable power sources in power system In 14th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2013, str 1-4.
- [8] KONÍČEK, M., BELÁŇ, A., IVANIČ, M., Impact of Distributed Sources on Safety Operation of Power System, In: 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2015, str. 492 – 495. ISBN 978-80-553-2187-5.
- [9] J. Kurcz, J. Longauer, F. Simančík a J. Poničan: Porovnanie prevádzkových režimov a optimalizácia manažmentu výroby obnoviteľných energií v energetickom hube ÚMMS SAV in: 45. Nekonenční zdroje elektrické energie (Hatě 2024), str. 37-40, ISBN 978-80-02-03054-6

RIADENIE A REGULÁCIA ENERGETICKÉHO SYSTÉMU ZA ÚČELOM OPTIMÁLNEJ VYUŽITELNOSTI FVE BEZ PRETOKOV

J. Poničan¹ J. Longauer² a J. Kurcz²

¹ Ústav materiálov a mechaniky strojov, INOVAL v.v.i. – Inovačné centrum Slovenská akadémia vied

² Ústav materiálov a mechaniky strojov, Slovenská akadémia vied

Abstract

The production of electricity from small and local photovoltaic (PV) sources in Slovakia increasingly faces challenges related to technical and legislative aspects. The implementation of European legal regulations is delayed, and national legislation is changing at an unreasonably fast pace. This requires continuous adaptation in the design and operation of small PV systems integrated into the energy infrastructure of smaller industrial facilities. This paper presents a model of a photovoltaic installation on the roof of the ÚMMS SAV production hall. PV panels are installed in heat-exposed skylight areas, simultaneously providing shading and reducing building overheating. The simulation of electricity generation and utilization is based on the actual load profile at the metering point, with various scenarios for the self-consumption of PV-generated electricity. The focus of the study is the management of renewable electricity production and consumption while minimizing reverse flows into the distribution grid through the billing meter. The generated electricity is consumed primarily in a single-shift production setup, mainly for various metallurgical manufacturing technologies and the cooling and air-conditioning of the production hall. Although battery storage is not currently implemented, the system is designed for future integration.

Úvod

Výsledky využitia FVE pre výskumno-vývojové aplikácie v rámci ÚMMS SAV už boli prezentované prezentované v minuloročnom zborníku NZEE 2024 [1]. V tomto príspevku je analyzovaný model využitia FVE bez batériového systému, na budove výrobné haly. Systém bude taktiež slúžiť na výskumno-vývojové účely, so zameraním na tepelnú energetickú bilanciu. Zámerom projektu je vyriešiť viacero technických výziev a znížiť primárnu spotrebu palív. Výrobná hala ÚMMS SAV v detašovanom pracovisku v Žiari nad Hronom má strechu so svetlíkmi, na ktorých občasne (najmä pri silných dažďoch) dochádza k zatekaniu vody. Taktiež cez svetlíky prúdi značné množstvo tepelnej energie do haly, ktorá v súčasnom stave nie je klimatizovaná, ani ventilovaná. Z týchto dôvodov bolo navrhnuté riešenie inštalovať nad svetlíkmi FVE s cieľom prekryť svetlíky pre zníženie množstva vstupujúcej tepelnej energie, zamedzeniu zatekania a v neposlednom rade výrobou elektriny pre vlastnú spotrebu s riadením prebytkov. Vzhľadom na klesajúce ceny samotných FV panelov sa takéto riešenie dostáva na pozitívnu ekonomickú úroveň a oblasť použitia nielen na primárny účel výroby elektriny, ale aj ako strešný konštrukčný prvok. Situácia umiestnenia haly je znázornená na obr.1.



Obr. 1: Situácia umiestnenia FVE na objekte haly ÚMMS SAV.

Pokiaľ nie je odberateľ elektriny súčasne výrobca elektriny, súčasná legislatíva neumožňuje toky výkonu do distribučnej siete (DS) pre takéto typy FVE [2]. V minulosti bola legislatívne ukotvená “tolerancia” posielat’ prebytky energie z výrobného zdroja maximálne 10% z inštalovaného výkonu pre „lokálny zdroj“ v dvoch po sebe nasledujúcich ¼ hodinách. Aktuálna legislatíva a technické podmienky prevádzkovateľa distribučnej siete (PDS) neumožňujú toky výkonu do DS ani v jednom 1/4 intervale, pokiaľ nie je v odbernom mieste právne definovaná výroba elektriny a s ňou spojené legislatívne povinnosti [2, 3].

V odbernom mieste je inštalovaný fakturačné meradlo – IMS s priebehovým meraním typu „A“ na primárnej – VN strane transformátora a máme plný prístup k fakturačným údajom o spotrebe odberného miesta

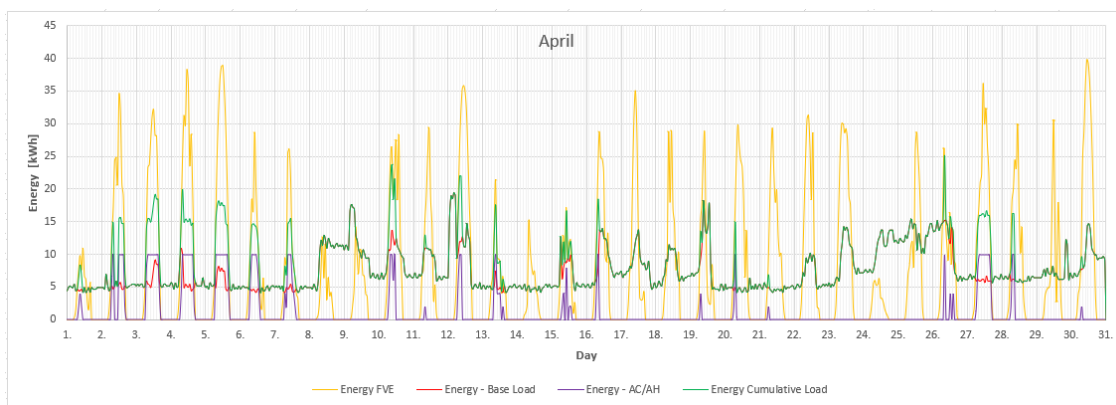
46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

v 15-minútovej granularite. Pre návrh modelu FVE boli využité reálne dáta diagramu spotreby v odbernom mieste. FVE bude navrhnutá pre potreby pokrývania diagramu zaťaženia s riadením prebytkov. Prebytky z FVE by mali byť aktívne riadené pre využitie v klimatizačných jednotkách, ktoré budú súčasťou energetického systému. Klimatizačné jednotky budú riadiť energetickú bilanciu FVE hlavne v letnom období, kedy budú vyrábať chlad a zlepšovať tepelnú pohodu vo výrobnjej hale. V zimnom období budú prebytky z FVE nižšie, no v prípade kedy budú generované, budú použité v klimatizačnej jednotke v režime vykurovania.

Model bol vytvorený pre simuláciu pokrývania diagramu zaťaženia výrobou FVE pre „jednotkový“ výkon FVE 1kWp. Diagram zaťaženia aj PVGIS dáta pre danú lokalitu boli brané z obdobia 2023. Pre danú lokalitu boli v systéme PVGIS zadefinované skutočné hodnoty pre orientáciu a sklon strechy a bol zvolený „jednotkový“ inštalovaný výkon FVE. Jednotkový výkon FVE je v modeli možné ľubovoľne zmeniť. Vzhľadom na dostupnosť plochy svetlíkov, na ktoré môžu byť FV panely inštalované, boli namodelované 3 varianty inštalovaného výkonu 25, 50 a 100 kWp. V prípade inštalovaného výkonu 50 kWp by boli prekryté svetlíky len na polovici strechy a JZ strane. Výsledky sú vyhodnotené v rámci jednotlivých mesiacov v roku s podrobnejším zameraním sa na priebehy v rámci vybraných dvoch dní. Všetky priebehy sú interpretované v hodinových intervaloch. Pre interpretovanie výsledkov sú v tomto článku vybrané nasledovné mesiace:

- Február, ako zimný mesiac, FVE 50 kWp s prebytkami do vykurovania,
- Apríl, ako prechodný mesiac, FVE 50 kWp s výraznými prebytkami do vykurovania,
- Júl, ako letný mesiac, FVE 50 kWp s výraznými prebytkami do chladenia.

Na obr. 2 je znázornený diagram spotreby a diagram výroby FVE s diagramom riadenia klimatizačnej jednotky. Simulácia riadenia klimatizačnej jednotky je v rozsahu 2-10 kW elektrického príkonu. Definovanie podmienok pre riadenie klimatizačnej jednotky sú okrajové podmienky teploty okolia. Pre potreby modelu sú teploty okolia použité zo systému PVGIS, rovnako ako aj výroba FVE s jednotkovým výkonom. Režim vykurovania je aktivovaný v prípade teploty nižšej ako 10°C. Režim klimatizovania je aktivovaný v prípade teploty vyššej ako 20°C. Vzhľadom na tepelnú pohodu v objekte je klimatizovanie potrebné od nižšej teploty, nakoľko teplota okolia nereflektuje skutočnú teplotu v hale – tá je vyššia a teplotný rozdiel sa výrazne zvyšuje v prípade slnečných dní. V grafickom priebehu krivka Energy FVE reflektuje výrobu FVE, červená krivka predstavuje skutočné zaťaženie v odbernom mieste v zmysle fakturačného meradla. Fialová krivka predstavuje energiu z prebytkov FVE, ktorá bola využitá v klimatizačnej jednotke. Zelená krivka predstavuje zmenený diagram odberu práve o energiu spotrebovanú klimatizačnou jednotkou.

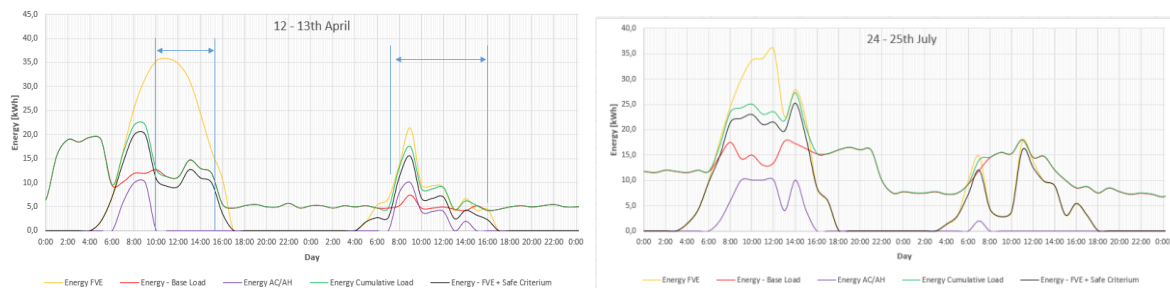


Obr. 2: Diagram spotreby a diagram výroby FVE s diagramom riadenia klimatizačnej jednotky.

Na obr. 3 je časový výsek 12.-13. apríl a 24.-25. júl, ktoré boli vybrané pre detailnejšie porovnanie riadenia prebytkov. Prvý deň výroba z FVE výrazne prevyšuje spotrebu, aktivuje sa aj klimatizačná jednotka v režime vykurovania, no predpoludním sa zvýši teplota nad definovanú hodnotu – 10 °C a už nie je potrebné vykurovať. Teplota je v rozsahu 10-20 °C a takže nie je potrebné klimatizovať. Ďalší deň bolo zaťaženie nízke – na úrovni základného zaťaženia, nakoľko bola sobota. FVE pokrývala spotrebu, navyše bola aktívne riadená klimatizácia v režime vykurovania. Celková spotreba (zelená krivka) bola zvýšená o spotrebu klimatizačnej jednotky (fialová krivka). V druhom prípade (mesiac júl), bola aktívne riadená klimatizácia v režime chladenia. Prvý deň bola v prevádzke takmer celú dobu výroby FVE, druhý deň FVE pokrývala len pásmo základného zaťaženia. Regulácia prietokov výkonu do DS je vykonávaná na úrovni striedača – teda striedač upravuje výstupné napätie tak, aby nedochádzalo k pretoku výkonu za fakturačné meradlo. Regulácia prietokov výkonu na 0 je vyžadovaná prevádzkovateľom DS. V niektorých prípadoch PDS vyžaduje, aby do DS v žiadnom prípade nenastal ani krátkodobý výkonový impulz – pod úroveň kumulatívnej hodnoty činnosti energie v 15 min. intervale.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

IMS má v zmysle vyhlášky [4] funkcionality [5], medzi ktoré patrí napr. aj „maximálna hodnota fázového prúdu“ – teda PDS dokáže detegovať, či k prekmitu výkonu došlo. Takéto prekmity sú bežné pri dynamike regulácie striedača, napr. pri dynamickej zmene výkonu FVE, ale aj pri okamihu odpojenia časti záťaže. V modeli bolo pre takýto prípad vytvorené aj tzv. „Safety criterium“, ktoré predstavuje parameter, pričom je ním definovaná hodnota výkonu, o ktorú bude striedač regulovať výkon FVE smerom nadol. Teda pri odpojení záťaže o tento výkon nenastane prekmit výkonu do siete.



Obr. 3: Časový výsek obdobia vyhodnotenia priebehov výroby, spotreby a riadenia prebytkov, a) 12.-13. apríl, b) 24.-25. júl.

Zhrnutie výsledkov

V závere vyhodnotenia sú prezentované základné ukazovatele energetickej bilancie z výsledkov v simulovaných vyššie popísaných riešení. Výsledky sú prezentované podľa reálnej spotreby v odbernom mieste z diagramu spotreby a diagramu výroby FVE definovaných inštalovaných výkonov. Z výsledkov je zrejmé, že vplyvom výroby FVE bude časť výroby spotrebovaná na pokrývanie základného zaťaženia v odbernom mieste, časť výroby bude aktívne riadená pre klimatizačnú jednotku (v režime vykurovania a chladenia) a časť (potenciálnej) výroby bude zregulovaná z dôvodu nevyužitých prebytkov, ktoré nie je možné poslať do DS. Ako je vidieť v tab. 1, množstvo prebytkov rastie s veľkosťou inštalovaného výkonu, keďže základné zaťaženie v odbernom mieste je presne definované. Využitím aktívne riadenej klimatizačnej jednotky je možné výrazne zvýšiť mieru využitia prebytkov z FVE pre zvýšenie tepelnej pohody v objekte, najmä v teplých letných dňoch. V jarných mesiacoch sú prebytky využité pre vykurovanie v objekte a tým je ušetrená časť nákladov na vykurovanie. V neposlednom rade je prezentovaným riešením výrazne obmedzené zatekanie vody cez svetlíky do objektu.

Tab. 1: Vyhodnotenie energetickej bilancie energetického systému s FVE.

Popis	február			apríl			júl		
	25kWp	50kWp	100kWp	25kWp	50kWp	100kWp	25kWp	50kWp	100kWp
Výroba FVE podľa inštalovaného výkonu [kWh]	1354	2709	5418	2529	5058	5418	3587	7175	14349
Základná spotreba v odbernom mieste [kWh]	7594	7594	7594	5377	5377	7594	5633	5633	5633
Spotreba klimatizácie z prebytkov FVE [kWh]	54	556	1120	296	734	1120	764	1998	2468
Obmedzenie výroby z FVE [kWh]	26	194	1854	346	1942	1854	290	2156	8565
Miera pokrytia využitia FVE vrátane AC/AH	98,1%	92,8%	65,8%	86,3%	61,6%	65,8%	91,9%	69,9%	40,3%
Miera pokrytia FVE bez využitia AC/AH	94,1%	72,3%	45,1%	74,6%	47,1%	45,1%	70,6%	42,1%	23,1%
Miera nárastu zaťaženia vplyvom AC/AH	0,7%	7,3%	14,7%	5,5%	13,7%	14,7%	13,6%	35,5%	43,8%
Miera regulovaných prebytkov z FVE - regulácia na 0	0,3%	2,4%	21,3%	6,1%	31,8%	21,3%	4,5%	28,3%	105,7%
Miera regulovaných prebytkov z FVE - regulácia na "Safety criterium"	1,1%	4,6%	24,6%	10,8%	39,3%	24,6%	11,1%	36,1%	114,6%

Pre identifikáciu vhodných výkonov zariadení v energetickom systéme využitia generovanej energie z FVE sme interpretovali výsledky z 3 výkonových úrovní FVE (25, 50, 100 kWp), a vypočítali tepelné zisky a potrebu chladenia priestoru haly. Uvažovali sme s prekrytím všetkých svetlíkov panelmi s odstupom cca 150 mm od strechy a miernym sklonom 15° do strany na odvod vody. Cenovo sa inštalácia FVE pohybuje na úrovni 30, 42, 84 tisíc €, s proporčným pripojením výkonov do elektroinštalácie haly. Pričom návratnosť investície je kalkulovaná z bilancie výroby. Investícia zahŕňa Invertorový multisplit na úrovni 45 kW_{chl}, 50 kW_i. Ako druhé alternatívne riešenie bolo navrhnuté adiabatické chladenie, ktoré je o polovicu lacnejšie, avšak neumožňuje vykurovať halu v zimnom období - v prípade generovaných prebytkov. To v prípade multisplitu umožňuje významne offsetovať podiel spotrebovaného zemného plynu a tým znížiť návratnosť. V prípade inštalovania FVE s 25 kWp (75kWp pasívne bez kabeláže a invertorov) je návratnosť 7,6 roka (7,3 roka pre 50 kWp a 11,3 pre 100 kWp). V prípade inštalácie adiabatického chladenia pri 25 kWp je 5,4 roka, resp. 6,4 roka pre 50 kWp a 11 rokov pre 100 kWp, s významným ovplyvnením pracovného prostredia najmä vplyvom vlhkosti vzduchu.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci programu Obnoviteľná energia pre vytvorenie vyváženého ekologického programu znižovania emisií uhlíka. Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SRv rámci projektu 09I04-03-V02-00033.

Founded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I04-03-V02-00033.

Literatúra

- [1] J. Kurcz, J. Longauer, F. Simančík a J. Poničan: Porovnanie prevádzkových režimov a optimalizácia manažmentu výroby obnoviteľných energií v energetickom hube ÚMMS SAV in: 45. Nekonvenční zdroje elektrické energie (Hatě 2024), str. 37-40, ISBN 978-80-02-03054-6, online <https://nzee.cz/download/sbornik/Sbornik_NZEE_2024.pdf>
- [2] Zákon 309/2009 Z. z., O podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov, § 4b, ods.15, online, <<https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2009/309/#positionY-22924.400390625>>
- [3] Lokálny zdroj podľa zákona o podpore OZE, online <<https://www.polacekpartners.sk/clanok/boom-vo-vyuzivani-oze-lokalny-zdroj>>
- [4] Vyhláška 358/2013 Z. z., § 4, Ministerstva hospodárstva Slovenskej republiky ktorou sa ustanovuje postup a podmienky v oblasti zavádzania a prevádzky inteligentných meracích systémov v elektroenergetike, online <<https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2013/358/>>
- [5] Príručka na 4-kvadrantový / kombinovaný elektromer LZQJ-XC podľa špecifikácie VDEW 2.1, kapitola 8, časť 8.1 –Systém identifikácie objektu OBIS, online <http://85.248.37.165/dokumentacia/prirucka_lzqj-xc.pdf>

PŘELOM (Č. 2) VE VÝVOJI ŘÍZENÉ TERMOJADERNÉ FÚZE

M. Řípa

Abstract

Seventy years ago, fusion communities in the East and West responded to the scale and complexity of the challenges they faced by creating a form of international cooperation. The visit in 1956 by Soviet leader Nikita Khrushchev and Igor Kurchatov, the father of Soviet nuclear research, to the Institute for Atomic Energy Research in Harwell, UK, was a watershed moment that paved the way for a common global sharing of fusion knowledge. To some extent, and despite the enormous progress that fusion has made since then, the situation today resembles that of seven decades ago: two “systems” or “communities,” this time public and private, now coexist, engaged in the same quest and solving similar problems. (Robert Arnoux)

Úvod obstaral tokamak

První zmínka o soukromé fúzi se týká ku podivu ne magnetického, ale inerciálního udržení. KMS Industries! Ještě podivnější je, že KMS byla úspěšná, že Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL) dostala jako vládní ústav „příkaz“ od vlády USA, aby plnila požadavky KMS – soukromé firmy Kipa Miltova Siegla. KMS se podařilo vyřešit hromadnou výrobu laserový terčů. Faktem je, že žádná soukromá fúzní soukromá společnost srovnatelného úspěchu dosud nedosáhla. [1]

I bez KMS nepochybně začaly soukromou fúzi brát vážně poprvé Spojené státy.

Nejlepší způsob, jak dorazit do cíle dříve než soupeři, je mít v dostihu více koní. To znamená rychlý vývoj paralelních přístupů k fúzi. Počínaje sedmdesátými léty si Spojené státy přivlastnily lví podíl financování pokročilých toroidálních reaktorů, zejména tokamaku ruské konstrukce, který si brzy vytvořil náskok nejen ve Spojených státech, ale na celém světě. Jedna výjimka tu byla a totiž pro výzkum laserové fúze vzhledem k jeho primárnímu využití k simulaci výbuchů jaderných zbraní po podpisu Smlouvy o zákazu jaderných zkoušek. Všechny ostatní projekty netoroidálních reaktorů byly drasticky v USA přerušeny nebo zrušeny a tento jednokolejný přístup ze strany vlády z velké části pokračoval více méně donedávna.

Nicméně na přelomu 21. století vědci - podnikatelé – ve Spojených státech oprášili mnoho z původních často netoroidálních konceptů a zajistili financování od miliardářů a firem rizikového kapitálu na vytvoření soukromých fúzních startupů. Ukázalo se, že některé z těchto potenciálně transformativních zařízení jsou nyní životaschopnými uchazeči o dosažení komercializace pomocí koncepčních topologií², jejichž vývoj, nasazení a provoz jsou potenciálně levnější a rychlejší než už téměř tradiční toroidy. Ovšem skupina investorů rizikového kapitálu, kteří mají chuť na hraniční investice do fúze, je však velmi omezená vzhledem k tomu, že standardní investiční teze je zaměřena na projekty s návratností do pěti let a na projekty s menším technologickým rizikem než jsou tokamaky - zařízení zacílené na termojadernou fúzi – procesem s nádechem science fiction.

Amerika hledající

Pro fúzní veřejnost nebylo tajemstvím, že rozpočet USA na výzkum fúze v roce 2016 v Úřadu pro vědu patřícímu Ministerstvu pro energii, (DoE, Department of Energy), tedy vládě, činil 438 milionů dolarů, z čehož koncepty alternativních netoroidních reaktorů nedostaly nic! Jediná podpora pro alternativy toroidů byla ze samostatného grantu ARPA-e ve výši 30 milionů dolarů. Amerika má ale eso v rukávu – těží z brilantní mezinárodní základny vědců a inženýrů pracujících na řadě unikátních projektů fúze probíhajících na univerzitách, v národních laboratořích a v soukromém sektoru, který už dnes ovšem potřebuje lepší financování, aby postoupil do fáze technologické připravenosti. Faktem je, že jsem se nikde nedočetl, proč Princeton v roce 1997 rozmontoval zdatného konkurenta evropského tokamaku JET, což byl mimořádně úspěšný tokamak TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor).

Zatímco Asie, Rusko a EU utrácí miliardy téměř výlučně na toroidální udržení, USA si spontánně zmírňují rizika tím, že nemají všechna vejce v jednom košíku, a tak podporují řadu modifikovaných fúzních reaktorů, které se na americké půdě právě nyní téměř ilegálně rozvíjejí (konfigurace s obráceným polem RFC, magnetické cuspy/vstřicná pole, magnetizovaný terč, Z-pinch, elektrostatické udržení atd.). Amerika může tak

² **Topologie** (z řeckého topos - místo a logos - studie) je obor matematiky, opírající se o velmi obecný výklad pojmu prostor (topologický prostor). Studuje takové vlastnosti útvarů, které se nemění při oboustranně spojitých transformacích („blízké“ body se transformují opět v „blízké“ body).

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

maximalizovat svůj talent a kultivovat celé fúzní pole fúze vzhledem k nemožnosti předpovědět, kde se objeví průlom. Stejně jako v případě letectví, dosažení fúze jako první, může Americe přinést řadu výhod, které doprovázejí komercializaci většinu nových odvětví techniky a vědy.

Privátní fúze dobývá svět – INFUSE

V roce 2017 historicky první přehled stávajících privátních startupů na světě sepsal a připravil k vydání autor této statě pod názvem Soukromý kapitál ve výzkumu řízené termojaderné fúze [2].

Brzy čistě privátní laboratoře začaly koketovat v USA s vládními institucemi a zcela přelomovým oficiálním aktem bylo vyhlášení projektu INFUSE (Innovation Network for Fusion Energy) v roce 2019. Ministerstvo pro energii USA, vypisovatel projektu, si od spolupráce sliboval doslova a do písmene výhody na obou stranách, především však pro USA jako celek, – krátce a stručně – rychlejší dosažení komerčního využití fúzní energie v praxi, rychleji, než kdyby obě entity pracovaly na stejném tématu odděleně. Zdá se, že dvanáct stávajících privátních společností zabývajících se termojadernou fúzí a Ministerstvo pro energii USA našly společnou řeč. Konečně jejich spolupráce je v souladu se současnou americkou politikou pyšným „America First“, tentokrát ve spuštění elektrárny s termojaderným reaktorem.

Inovační síť pro energii z jaderné fúze (INFUSE) si vybrala řadu projektů s dotací ve výši 50 000 až 200 000 USD, přičemž podíl partnerů z průmyslu musil být alespoň 20 %. Zvláštní pozornost byla věnována „podpůrným technologiím“, které by mohly přispět k urychlení vývoje fúzní energie, jako jsou nové a vylepšené často vysokoteplotní supravodivé magnety, věda o materiálech, diagnostika, modelování a simulace a experimentální originalita.

Nový program řídí od samého počátku národní laboratoř financovaná DoE – Oak Ridge National Laboratory (ORNL) spolu s laboratoří fyziky plazmatu Princeton Plazma Physics Laboratory (PPPL). Ředitel společnosti ORNL Dennis Youchison, inženýr jaderné fúze s rozsáhlými zkušenostmi v oblasti komponent plazmatických zařízení, funguje jako vedoucí projektu a jeho zástupcem je Ahmed Diallo, fyzik s hlubokými znalostmi v oblasti laserové diagnostiky.

Prostřednictvím INFUSE mohou soukromé společnosti získat přístup ke špičkovým zařízením a k dlouholetým zkušenostem výzkumných pracovníků DoE, kteří se zabývají výzkumem jaderné fúze, od konce padesátých let konkrétně k národním laboratořím v Pacific Northwestu, Idaha, Brookhavenu, Lawrence Berkeley, Los Alamos a Lawrence Livermore a se soukromými firmami, účastníky programu INFUSE.

„Stále více projektů soukromých společností ve Spojených státech se zajímá o systémy jaderné fúze a my chceme přispět vědeckými řešeními, která napomohou tomu, aby se termojaderná fúze stala realitou“, zdůraznil ředitel laboratoře ORNL a vedoucí projektu INFUSE Dennis Youchison.

Fúzní úspěchy

Současně se ovšem ve Spojených státech někteří členové Kongresu ptali, proč by daňoví poplatníci měli pokračovat ve financování fúze vzhledem k desetiletím a miliardám, které již byly vynaloženy „bez jakýchkoli výsledků“. Co musí fúze ukázat nebo snad ukázala? Nu, kupodivu ukázala toho hodně. Výkon fúze se od jejího, experimentálního prvopočátku před sedmdesáti lety zvýšil faktorem 100 000, zdvojnásobuje se každých 1,8 roku (rychleji než zní Mooreův zákon pro digitální svět). V 60. letech 20. století bylo možné dosáhnout méně než 1 % výkonu breakeven³. Dnes vědci dosáhli 67 % breakevenu, což znamená, že k výrobě 16 megawattů výkonu z jaderné fúze bylo zapotřebí pouhých 24 megawattů elektrického příkonu. **Kromě toho se pokrok v podpůrných technologiích přímo shodoval s trajektorií výkonu fúze, která vedla k vedlejším produktům odhadovaným na více než 300 miliard dolarů!**

Od zahájení programu v roce 1953 toho fúze dosáhla s průměrnými náklady kolem 500 milionů dolarů ročně. Je to hodně nebo málo? Odpověď najdete na východ od našich hranic.

Rozpačitá Evropa

Zatímco za Atlantikem počet fúzních soukromníků utěšeně rostl, Evropa se jaksi nedokázala rozhodnout. Možná proto, že klasický, to je vládou financovaný přístup, byl tradiční, zakořeněný hlouběji než v Americe. Vždyť nesl úspěchy! Kupříkladu nejzdařilejší, zatím sice stále experimentální zařízení typu tokamak, se narodilo v Evropě, si vybrala jednu z nejevropštějších zemí – Francii, a to v konkurenci Číny, Japonska, Jižní Koreje, Indie a... Spojených států. Donedávna největší a dosud neúspěšnější fúzní zařízení – tokamak JET (Joint European Torus) – fungovalo ve Spojeném království pod hlavičkou Euratomu. Německo je další světový fúzní obr, který je opět z Evropy – zkrátka nebyl důvod opouštět zaběhnutý systém. Vládou financovaný výzkum termojaderné fúze.

³ Breakeven „je když“ poměr výkonu uvolněného fúzí/výkon potřebný k ohřevu plazmatu se rovná jedničce

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Společný workshop iteru a soukromníků = neuvěřitelné!

Ovšem právě nedávno ohlášený již čtvrtý termín spuštění prvního plazmatu světové fúzní jedničky tokamaku ITER (2016, 2019, 2025, 2034) donutil Evropu se zamyslet nad zaběhnutým „vládním“ režimem. Nehledě na to, že pevnou a vysokou evropskou hrází vládní fúze začaly prosakovat pramenky jiného způsobu financování. Tokamak Energy či Applied Fusion Systems z Anglie, Renaissance Fusion z Francie a General Fusion hybrid Kanady a Anglie. A najednou tikající bomba vybuchla!

V květnu 2024 pozvala Organizace ITER doslova celý fúzní svět do místa stavby monumentálního fúzního stroje ITER v Saint-Paul-lès-Durance k účasti na přelomovém Workshopu, který nazvala „Jak může ITER pomoci?“ s podtitulem „Energie z jaderné fúze pro všechny a všichni pro energii z jaderné fúze.“

Ať už byla uplatňována jakákoli kritéria účasti, hlavní aktéři různých projektů, které se objevily v posledních letech, byli čtvrtý týden v květnu v hledišti či dokonce na jevišti administrativní budovy Organizace ITER, aby představili své naděje a očekávání: byl to vůbec první fúzní workshop tokamaku ITER společný se světovým soukromým sektorem, včetně Evropského, který kdy byl uspořádán a svedl tak dohromady téměř 50 generálních ředitelů a vedoucích vědců od soukromých fúzních startupů spolu s průmyslovými dodavateli fúzní technologie a jejich zástupci z veřejných laboratoří, domácích agentur ITER a Organizace ITER – celkem asi 350 zúčastněných stran, které se snaží urychlit to, co je pravděpodobně nejambicióznější a hlavně nejpotřebnější podnik v historii lidstva.

Před sedmdesátí lety reagovaly fúzní komunity na Východě a Západě na rozsah a složitost výzev, kterým čelily, vytvořením formy mezinárodní spolupráce. Návštěva sovětského vůdce Nikity Chruščova a Igora Kurčatova, otce sovětského jaderného výzkumu, v roce 1956, Ústavu pro výzkum atomové energie v Harwellu ve Spojeném království, byla zlomovým okamžikem, který otevřel cestu ke společnému celosvětovému sdílení znalostí termojaderné fúze. Dnes politickou konkurenci nahradila konkurence způsobu financování! Mimochodem první setkání se uskutečnilo díky iniciativě Sovětského svazu. V hledišti bylo přibližně stejně posluchačů jako v Saint-Paul-lès-Durance – 300 odborníků nejen termojaderné fúze.

Jak může iter pomoci? nebo jak může být iteru pomoheno?

V současné době existuje téměř 50 soukromě financovaných fúzních startupů ve 12 zemích. Za posledních pět let přilákaly více než 5,5 miliardy eur v soukromých investicích a většina z nich provokuje ambicemi dodávat elektřinu vyrobenou z jaderné fúze do sítě v dohledné době (tedy dříve, než se objeví první plazma v tokamaku ITER, to je stále ještě daleko před zapálením fúze) a zkušenostmi, které od té doby charakterizují výzkum fúze. V roce 2022 soukromé fúzní dotace celého světa překonaly vládní! Do určité míry a navzdory obrovskému pokroku, kterého fúze dosáhla od doby, kdy se začala studovat za účelem uvolnění své energie, se dnešní situace podobá situaci před sedmi desetiletími: dva „systémy“ nebo chcete-li dvě „komunity“, tentokrát veřejná a soukromá vystřídaly dvě komunity politické, nyní koexistují a zabývají se stejným hledáním a řeší podobné problémy.

Proč se to všechno děje právě teď? "Protože fúze je připravena," prohlásil Andrew Holland, generální ředitel Asociace fúzního průmyslu (FIA, Fusion Industry Association), ve svém projevu k účastníkům workshopu. "Je připravena díky 70 letům veřejného výzkumu a vývoje. Startupy vědí, že stojí na ramenou gigantů." Druhé vysvětlení může být daleko prostší. Vládní fúze se ocitla ve slepé uličce a a více méně neví jak dál. Ať tak či onak je výborné, že se Workshop konal.

„Informace o tom, co jsme udělali a proč jsme to udělali, a možná ještě cennější, o tom, co jsme udělali a co jsme neměli udělat...“ tak shrnul vedoucí komunikace ITER Laban Coblentz, který se podílel na vzniku a organizaci workshopu, "tato konference je v podstatě o tom, s čím může ITER pomoci soukromníkům a současně rezonovala ozvěna – s čím mohou pomoci soukromníci?

Přístup ke kódům pro modelování plazmatu, jako je SOLPS-ITER, a účast v International Tokamak Physics Activity (ITPA) byly na prvním místě seznamu přání, kterými privátní společnosti odpovíděly výše položenou první, veřejnou, část otázky.

Velký zájem byl také o sdílení informací o diagnostických systémech, vlastnostech materiálů a dálkové manipulaci. Někteří soukromníci navrhovali vysílání nebo výměnu zaměstnanců; jiní vytvořili dlouhé seznamy, které zahrnovaly podporu návrhu plazmových komponentů, ohřevových systémů a magnetů a také spolupráci v oblasti nákupu a regulačních aspektů a pokroku ve vývoji „společného příběhu“...

Co už soukromé fúzní iniciativy přinesly či spíše přinesou? Na druhou nevyřčenou část otázky můžeme odpovědět třeba takto: Privátní komunity jsou hbité a odvážné, ani při prozkoumávání neortodoxních cest víceméně neriskují ztrátu serióznosti doprovázející zavedené vládní instituce a na zanedbaných územích mohou razit nové a nečekané cesty.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Epilog

První vlašťovka je tu: Smlouva soukromé TAE Technologies a vládní ITER organization: Účelem dohody mezi TAE a ITER je „podpora spolupráce a výměny v technických oblastech společného zájmu“. "Společně budeme pracovat na pokroku ve vývoji energie z jaderné syntézy a na dobře vyškolené pracovní síle."

Mimochodem TAE Technologies je nejstarší soukromá privátní společnost (založena 1998) a má dvě dceřiné společnosti "TAE Power Solutions (pro efektivnější a odolnější rozvodnou síť) a TAE Life Sciences (nové léky proti rakovině) – doplňují aktivity v oblasti jaderné syntézy, které probíhají od založení společnosti v roce 1998.

Hlavním zařízením TAE Technologies je kompaktní, lineární zařízení, které čeština nazvala „Pokročilá konfigurace s reverzním polem ohříváná svazkem - An advanced beam-driven field-reversed configuration", které je navrženo pro provoz s aneutronovou fúzí jader vodíku a bóru jedenáct jinak reakcí p11B. Budoucí zařízení se nazývá „Copernicus“.

V obou komunitách nicméně platí jedno společné: funding = fusion

Literatura⁴

- [1] Daniel Clery: A Piece of the Sun, The Overlook Press, New York, 2013
- [2] Milan Řípa: Soukromý kapitál ve výzkumu řízené termojaderné fúze, Věda kolem nás, Akademie věd ČR, ISSN 2464-6245, 2017
- [3] Milan Řípa: Řízená termojaderná fúze – minulost, současnost a budoucnost, Česká technika, 2020
- [4] Jan Mlynář: Nejžhavější sen pod Sluncem – Termojaderná fúze a ITER, Aldebaran Group for Astrophysics, 2023
- [5] Milan Řípa: Řízená termojaderná fúze v soukromých rukou; Československý časopis pro fyziku, č.4, 71 (2021), 288 – 298 str.
- [6] Milan Řípa: Dodatek k článku Řízená termojaderná fúze v soukromých rukou; Československý časopis pro fyziku, č.5, 71 (2021), 289 – 296 str.
- [7] Jan Mlynář: Ediční poznámka ke článku „Řízená termojaderná fúze v soukromých rukou“; Československý časopis pro fyziku, č.4, 71 (2021), 297 – 298 str.

⁴ **Poznámka k citovaným zdrojům:** Literatura pojednávající také o privátní fúzi [3,4] a Literatura pojednávající pouze o privátní fúzi [5,6,7]

DIGITÁLNÍ DVOJČE V OBLASTI STACIONÁRNÍHO BATERIOVÉHO ÚLOŽIŠTĚ

M. Sedlařík, O. Koudelka a P. Vyrůbal

Ústav elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika

Abstract

This paper focuses on the development of a digital twin concept for stationary energy storage systems utilizing second-life lithium-ion batteries. The proposed architecture integrates physical system monitoring with a digital layer composed of semi-empirical, data-driven and reduced order physical models. This structure enables real-time estimation of key battery parameters, such as State-of-Charge, State-of-Health and internal temperature. The approach addresses parameter variability typical of second life cells and provides a basis for predictive maintenance and operational optimization.

Úvod

S rozvojem digitalizačních technologií v oblasti elektroenergetiky se koncept digitálního dvojčete stal klíčovým nástrojem pro monitoring, prediktivní diagnostiku, optimalizaci provozu a řízení životního cyklu různých systémů, včetně bateriových energetických úložišť. Digitální dvojče představuje dynamický virtuální model fyzického systému, který na základě reálných provozních dat umožňuje sledování vnitřních stavů, predikci degradačních jevů a efektivní řízení chodu systému v reálném čase. Tato technologie se stále výrazněji uplatňuje i v oblasti stacionárních bateriových úložišť elektrické energie, která hrají významnou roli při integraci obnovitelných zdrojů do elektrizační soustavy. [1, 2]

V oblasti stacionárních úložišť dominují lithno-iontové (Li-ion) baterie díky své vysoké energetické hustotě, dlouhé cyklické životnosti, nízkému samovybíjení a provozní spolehlivosti. Jejich širší nasazení však přináší i výzvy spojené s degradací a bezpečností, přičemž tyto aspekty nabývají na významu zejména při dlouhodobém provozu a druhotném využití baterií tzv. second life aplikacích po ukončení jejich primárního cyklu životnosti, například v oblasti automobilového průmyslu.

Implementace digitálního dvojčete v oblasti stacionárních Li-ion úložišť přináší nejen možnosti pro zajištění bezpečného a optimalizovaného provozu v rámci jejich prvotního nasazení, ale rovněž se jeví jako klíčový nástroj pro včasné odhalení rizik a prediktivní údržbu v rámci second life aplikací. V tomto ohledu může digitální dvojče významně přispět k prodloužení životnosti článků, snížení provozních nákladů a zajištění celkové udržitelnosti akumulačních systémů. Integrací fyzikálně založených a matematických modelů s metodami strojového učení, které umožňují adaptivní odhad parametrů na základě provozních dat, lze dosáhnout přesného sledování stavu nabití (SOC), stavu zdraví (SOH) a predikce zbývajících životnosti (RUL) jednotlivých článků i celých bateriových modulů.

Cílem tohoto článku je navrhnout koncept digitálního dvojčete pro stacionární bateriová úložiště využívající second life Li-ion články. Návrh se zaměřuje na vytvoření systému, který umožní přesné sledování stavu baterií, predikci jejich chování a včasnou identifikaci degradace. S ohledem na vyšší míru variability parametrů u článků druhého životního cyklu je kladen důraz na kombinaci více modelovacích přístupů a jejich vzájemnou validaci.

Koncept digitálního dvojčete

Bateriové úložiště může být reprezentováno různými typy modelů, které se liší úrovní komplexnosti a způsobem popisu fyzikálně-chemických procesů probíhajících v baterii. Na jedné straně jsou elektrochemické modely, které detailně popisují děje spojené s přenosem náboje, difuzí částic a reakcemi v elektrolytické i elektrodové fázi během nabíjení a vybíjení. Na druhé straně se uplatňují empirické modely založené na analýze provozních dat a metodách strojového učení, které popisují chování baterie prostřednictvím nalezených vztahů mezi měřenými veličinami bez nutnosti explicitního modelování fyzikálních procesů. Alternativně lze baterii modelovat pomocí náhradních elektrických obvodů (ECM), které aproximují její dynamickou odezvu soustavou elektrických prvků, zejména rezistorů, kapacitorů a v některých případech i induktorů.

Koncept digitálního dvojčete je možné definovat různými způsoby, přičemž jeho základní podstatou je kontinuální monitoring reálného systému a jeho simulace v reálném čase. Tento princip splňuje více typů modelů, s výjimkou těch s vysokou mírou komplexity, které nejsou schopny provozu v reálném čase z důvodu

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

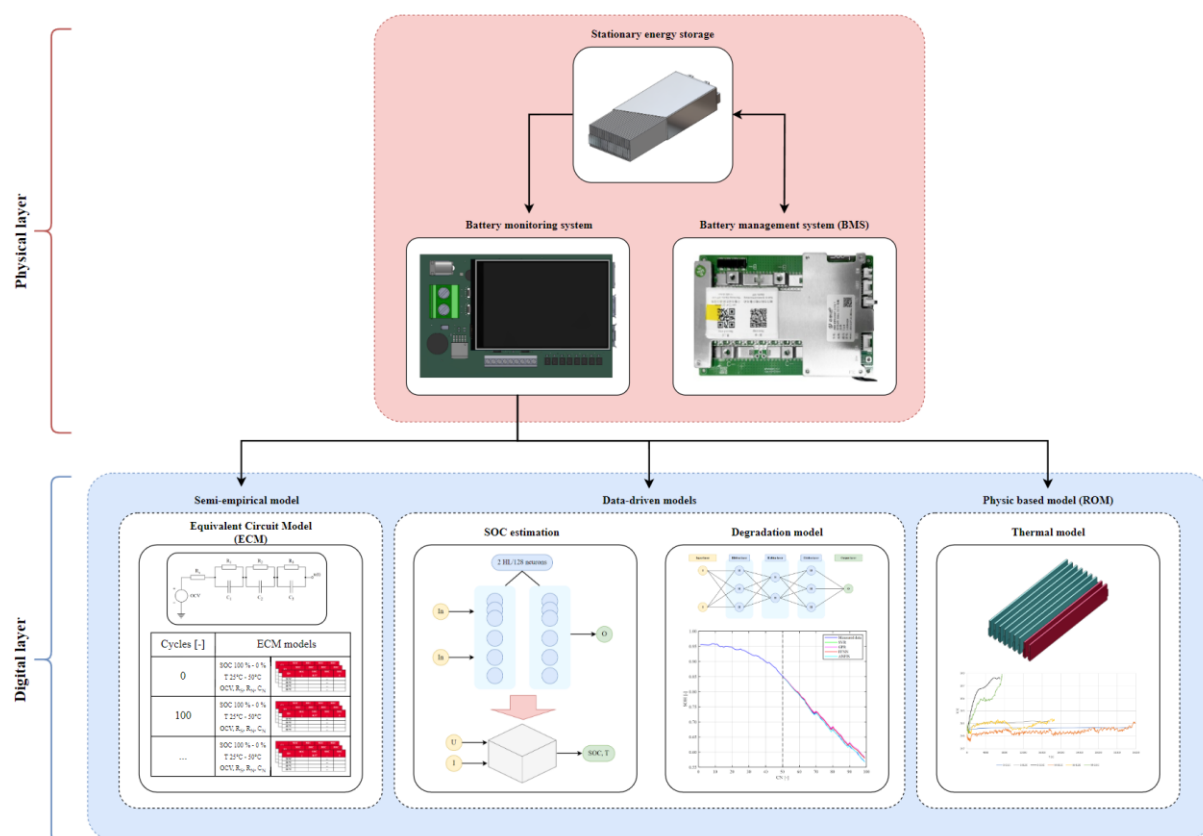
výpočetní náročnosti. V některých případech je digitální dvojčce založeno pouze na jednom typu modelu, který popisuje chování systému z omezené perspektivy. Takový přístup však neumožňuje zaznamenat všechny relevantní aspekty provozu a degradace, a proto není vhodný pro pokročilé analýzy nebo prediktivní řízení složitějších systémů. [2, 3]

Digitální dvojčce je určeno k přesnému sledování a odhadu aktuálního stavu systému, a proto je nezbytné využít kombinaci více modelů. Typicky se jedná o spojení redukovaných, ECM a datově řízených modelů, které využívají historická provozní data. Vzájemná validace těchto modelů je klíčová, neboť jednotlivé přístupy samostatně nemusejí vždy zajistit dostatečnou přesnost predikce. Ve studii Semerara et al. [4] jsou shrnuty aktuální trendy a mezery v oblasti digitálních dvojčat pro bateriové systémy.

Tepelné modely, nejčastěji založené na metodě konečných prvků (FEM) nebo metodě konečných diferencí (FDM), poskytují cenné informace o teplotním chování bateriového úložiště a přispívají k přesnějšímu odhadu jeho stavu. Jejich vysoká výpočetní náročnost však neumožňuje jejich přímé využití pro monitoring v reálném čase. Z tohoto důvodu je nezbytné provést modelovou redukci, která umožní efektivní analýzu klíčových provozních stavů s minimálními výpočetními nároky.

Architektura digitálního dvojčete

Obr. 1 znázorňuje architekturu digitálního dvojčete určeného pro stacionární bateriové úložiště. Architektura je rozdělena do dvou hlavních vrstev: fyzické vrstvy a digitální vrstvy.



Obr. 1: Architektura digitálního dvojčete pro stacionární bateriové úložiště. [5, 6]

Fyzická vrstva představuje reálný systém stacionárního bateriového úložiště, který zahrnuje samotný bateriový modul, Battery Management System (BMS) a systém pro monitorování baterie. BMS zajišťuje ochranu a řízení jednotlivých článků, zatímco monitorovací systém sbírá klíčové provozní veličiny, jako jsou napětí, proud, teplota a počet cyklů. Tato data jsou dále předávána do digitální vrstvy, kde tvoří vstupní bázi pro prediktivní a analytické modely digitálního dvojčete. Monitorovací systém tak zároveň funguje jako rozhraní mezi fyzickou a digitální vrstvou a v případě detekce kritického stavu umožňuje odpojení zátěže od baterie nebo přerušování nabíjení prostřednictvím integrovaných ochranných prvků.

Digitální vrstva tvoří jádro navrhovaného digitálního dvojčete a je založena na souboru modelů, které umožňují simulaci, analýzu a predikci stavu bateriového úložiště v reálném čase. Každý z těchto modelů se zaměřuje na odlišný aspekt chování systému a společně poskytují komplexní přehled o jeho dynamice,

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

aktuálním stavu i degradačním vývoji. S ohledem na potřebu zachovat vysokou přesnost estimace při nízké výpočetní náročnosti architektura kombinuje semi-empirické, datově řízené a zjednodušené fyzikálně založené modely.

- **Equivalent Circuit Model:**

Semi-empirický model využívající elektrických prvků (rezistory, kapacitory) k aproximaci napěťové odezvy baterie v různých provozních stavech. Umožňuje simulaci dynamického chování při nízké výpočetní náročnosti.

- **Datově založený model odhadu stavu nabití:**

Datově řízené modely využívající metody strojového učení, zejména neuronové sítě, umožňují odvozovat stavové a provozní veličiny baterie na základě dostupných dat.

- **Model degradace**

Prediktivní model založený na historických datech a neuronových sítích odhaduje pokles kapacity baterie na základě parametrů získaných z nabíjecích cyklů. Výstupem je predikce RUL, která slouží k optimalizaci provozního řízení úložiště.

- **Termální model:**

Zjednodušený fyzikálně založený model ve formě redukováného modelu, umožňující efektivní simulaci teplotního profilu článků bez potřeby náročných numerických výpočtů. Slouží k prevenci přehřátí a zajištění bezpečnosti systému.

Propojení mezi fyzickou a digitální vrstvou je realizováno prostřednictvím soustavy senzorů integrovaných v systému pro monitorování baterií. Tento systém zajišťuje individuální sledování klíčových provozních parametrů každého článku, zejména napětí, proudu a teploty a kontinuálně přenáší naměřená data do digitální vrstvy.

Závěr

V rámci práce byl proveden systematický návrh digitálního dvojčete určeného pro sledování a řízení stacionárního bateriového úložiště využívajícího second life Li-ion články. Navržená architektura propojuje fyzickou vrstvou systému se sadou modelů tvořících digitální vrstvu, které pokrývají různé aspekty provozu a stárnutí baterie. Kombinace semi-empirických, datově řízených a redukováných fyzikálních modelů umožňuje nejen popsat okamžitý stav systému, ale také predikovat jeho budoucí vývoj. Důraz byl kladen na reálnou použitelnost modelů s ohledem na výpočetní náročnost a variabilitu parametrů second life článků. Výsledkem je koncepční návrh digitálního dvojčete, které lze v budoucnu rozšířit a integrovat jako součást inteligentní BMS kombinujícího standardní řídicí funkce s pokročilým monitoringem a prediktivní analýzou stavu úložiště.

Poděkování

Tato práce byla podporovaná grantem specifického výzkumu VUT (projekt č. FEKT-S-23-8286).

Literatura

- [1] B. Wu, W. D. Widanage, S. Yang, and X. Liu, "Battery digital twins: Perspectives on the fusion of models, data and artificial intelligence for smart battery management systems", *Energy and AI*, vol. 1, 2020
- [2] F. Naseri et al., "Digital twin of electric vehicle battery systems: Comprehensive review of the use cases, requirements, and platforms", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 179, 2023
- [3] K. Zhao et al., "Digital Twin-Driven Estimation of State of Charge for Li-ion Battery: Comprehensive review of the use cases, requirements, and platforms", *2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON)*, vol. 179, May 2022
- [4] C. Semeraro, H. Aljaghoub, M. A. Abdelkareem, A. H. Alami, and A. G. Olabi, "Digital twin in battery energy storage systems: Trends and gaps detection through association rule mining", *Energy*, vol. 273, 2023
- [5] M. Sedlařík et al., "Advanced machine learning techniques for State-of-Health estimation in lithium-ion batteries: A comparative study", *Electrochimica Acta*, vol. 524, 2025
- [6] C. Semeraro, H. Aljaghoub, M. A. Abdelkareem, A. H. Alami, M. Dassisti, and A. G. Olabi, "Guidelines for designing a digital twin for Li-ion battery: A reference methodology", *Energy*, vol. 284, 2023

MOŽNOSTI VYUŽITÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO VÝROBU MECHANICKÝCH ČÁSTÍ PRO FVE

P. Šafl a J. Kolísek

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně

Abstract

The aim of this thesis is to analyze the possibilities of using additive manufacturing technologies, especially 3D printing, for the design and production of mechanical components for photovoltaic power plants. The work focuses on the optimization of shapes and materials of mechanical parts such as brackets, covers, cooling rectifiers or protective structures found in PV systems. Emphasis is placed on the use of polymer and composite materials enriched with conductive additives. The work includes the design, fabrication and testing of selected components, including evaluation of mechanical and functional properties.

Úvod

S rostoucím rozsahem instalací fotovoltaických elektráren (FVE) se zvyšuje poptávka po efektivních a spolehlivých řešeních v oblasti mechanických komponent nosných a montážních systémů. Tradiční výrobní metody často narážejí na omezení z hlediska nákladů, časové náročnosti a přizpůsobitelnosti. Tato studie se zabývá využitím aditivních technologií, zejména 3D tisku, pro návrh a výrobu funkčních dílů určených pro venkovní prostředí. Důraz je kladen na volbu vhodných materiálů s ohledem na mechanickou odolnost, stárnutí vlivem UV záření a působení klimatických podmínek.

Experiment

Prostudovat a shrnout možnosti využití aditivních technologií, zejména 3D tisku metodou FDM, pro výrobu konstrukčních a funkčních částí pro prostředí obnovitelných zdrojů energie, konkrétně fotovoltaických elektráren (FVE).

Aditivní výrobní technologie, zejména 3D tisk, zažívají rychlý rozvoj a nacházejí uplatnění i v oblasti obnovitelných zdrojů. Cílem je prověřit využití FDM technologie pro návrh a výrobu mechanických komponent FVE s důrazem na cenovou dostupnost, rychlou prototypovou výrobu a aplikaci ve specifickém prostředí (UV záření, tepelné výkyvy, vlhkost, mechanické zatížení). Práce vychází z přehledu dostupných studií a případových aplikací 3D tisku pro technické součásti FVE, jako jsou nosné prvky, kryty a další prvky.

Zanalyzovat vlastnosti moderních kompozitních materiálů vhodných pro aditivní výrobu – především nylonu a jeho směsí s uhlíkovými vlákny a HTPLA s příměsí mědi.

V rámci studie bude analyzován materiál PA-CF (nylon vyztužený uhlíkovými vlákny) a HTPLA, které vyniká mechanickou pevností, tuhostí a stabilitou. Hodnocení se zaměří na pevnost v tahu, teplotní a rozměrovou stabilitu, chování při povětrnostních vlivech a změny vlastností v čase. Součástí bude také posouzení vhodnosti pro technicky náročné díly ve venkovním prostředí.

Vyrobít prototypy zvolených komponent 3D tiskem a navrhnout metodiku jejich testování – se zaměřením na mechanické a elektrické vlastnosti a vhodnost pro venkovní použití.

Tato fáze ověří reálnou vyrobitelnost komponent aditivní technologií. Na základě optimalizovaných parametrů (výška vrstvy, výplň, orientace) budou vytištěny vzorky a podrobeny testům pevnosti (ISO 527), a elektrickým testům. Cílem je určit, zda testované komponenty splňují technické požadavky FVE a mohou nahradit konvenčně vyráběné díly.

Vyhodnotit výhody a limity využití aditivních technologií při výrobě mechanických dílů pro obnovitelné energetické systémy, zejména z pohledu: nákladovosti, technologické vhodnosti, trvanlivosti a opakovatelnosti výroby.

Na základě experimentálních výsledků bude analyzována nejen samotná výroba a funkčnost dílů, ale i její náročnost, možnosti úprav, citlivost na geometrii a změny vlastností mezi tiskovými dávkami. Hodnocení se zaměří na vliv mechanického zatížení a klimatických podmínek na životnost a opakovatelnost výsledků. Cílem je formulovat doporučení pro efektivní využití 3D tisku ve FVE, včetně limitů pro nasazení této technologie v praxi.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Výběr materiálu:

Výběr vhodného materiálu byl zásadní pro zajištění funkčnosti mechanických prvků určených k uchycení komponent fotovoltaické elektrárny (FVE) ve venkovním prostředí. Při rozhodování byl kladen důraz na mechanickou pevnost, tuhost, odolnost vůči klimatickým vlivům (zejména teplotním výkyvům a vlhkosti), rozměrovou stabilitu a možnost kvalitního tisku metodou FDM/FFF.

Na základě těchto požadavků byl jako nejvhodnější zvolen nylon PA12 vyztužený uhlíkovými vlákny v poměru 15 % (PA12 CF15). Tento kompozit spojuje výborné vlastnosti polyamidu s tuhostí a pevností karbonových vláken, přičemž zároveň vykazuje nízkou tepelnou roztažnost. Díky nízké nasákavosti a stabilnímu chování při dlouhodobém vystavení vlhkosti a teplotním změnám je vhodný i pro venkovní aplikace. Materiál je navíc dobře tisknutelný na FDM tiskárnách s uzavřenou komorou a zvládá vysoké tiskové teploty bez deformací. Z těchto důvodů byl PA12 CF15 vybrán jako ideální pro konstrukční prvky FVE a použit při výrobě všech testovaných vzorků.

Výběr alternativního materiálu – HTPLA s příměsí mědi pro následné pokovení

Pro praktickou část experimentu byl zvolen také HTPLA s příměsí měděných částic, a to za účelem ověření jeho využitelnosti při výrobě konstrukčních dílů pro uchycení komponent FVE ke střešní konstrukci. Tento materiál je zajímavý především možností následného pokovení, které může zlepšit jeho funkční vlastnosti, jako je vodivost nebo ochrana proti degradaci.

HTPLA (High-Temperature Polylactic Acid) je upravená verze PLA s vyšší teplotní odolností a rozměrovou stabilitou po dodatečném tepelném zpracování. Příměs jemných měděných částic umožňuje pokovení dílů elektrochemickou cestou, čímž lze vytvořit vodivý povrch. Díky tomu je materiál vhodný např. pro EMI stínění nebo vedení sekundárního proudu (např. propojení kovových částí kvůli eliminaci potenciálů či ochranu před přepětím). I když samotný HTPLA není vhodný pro přenos výkonu, po pokovení je možné jeho nasazení v méně zatížených aplikacích, kde je prioritou vodivost nebo povrchová ochrana.

Měření mechanických vlastností

Pro ověření mechanických vlastností byly otestovány vzorky dvou materiálů – HTPLA s příměsí mědi a nylon PA12 vyztužený 15 % uhlíkových vláken (PA12 CF15), viz tab. 1 a 2. Zkoušky proběhly na trhačím zařízení podle normy ISO 527, s cílem zjistit hodnoty pevnosti v tahu a deformačního chování při zatížení.

Vzorky byly tištěny v jednotném režimu s orientací vrstev odpovídající reálnému namáhání v konstrukčních dílech. Každý byl zatěžován konstantní rychlostí až do přetržení, přičemž byl zaznamenán průběh zatížení a prodloužení. Na základě těchto dat bylo možné stanovit maximální sílu, protažení a další charakteristiky.

Tab. 1: Průměrované naměřené hodnoty vlastností materiálu HTPLA.

Vzorek	$F_{\max}$ [N]	$S_{\max}$ [mm]	F_{end} [N]	S_{end} [mm]	$A_{\max}$ [%e]	A_{end} [%e]	δ_m [MPa]
Průměr	394,25	2,29	358,09	4,43	3,94	7,65	39,42

Tab. 2: Naměřené vlastnosti materiálu PA 12 CF15 čistý.

Vzorek	$F_{\max}$ [N]	$S_{\max}$ [mm]	F_{end} [N]	S_{end} [mm]	$A_{\max}$ [%e]	A_{end} [%e]	δ_m [MPa]
Průměr	1360,99	1,52	1227,36	1,70	2,17	2,43	136,10

Porovnání mechanického chování materiálů PA12 CF15 a HTPLA–Cu

Výsledky ukazují, že PA12 CF15 dosahuje několikanásobně vyšší pevnosti než HTPLA a lépe odolává zatížení, zatímco HTPLA vykazuje vyšší protažení. Naměřené hodnoty tak umožňují přímé srovnání materiálů z hlediska jejich vhodnosti pro použití v nosných prvcích FVE.

Pevnostní charakteristiky

Průměrná maximální tahová síla $F_{\max}$ pro PA12 CF15 činí 1378,12 N, zatímco u HTPLA–Cu dosahuje pouze 394,25 N, což představuje více než 3,5násobný rozdíl ve prospěch nylonového kompozitu. Tento rozdíl se promítá i do hodnot napětí (pevnosti v tahu, δ_m), kde PA12 CF15 dosahuje průměrné hodnoty přibližně 137,3 MPa, oproti 39,4 MPa u HTPLA. Z hlediska mechanického namáhání to znamená, že PA12 CF15 je výrazně lépe připraven na přenos větších sil, například působení tlaku a tahu vzniklého v důsledku silného větru, který na střešních instalacích může generovat vysoké dynamické zatížení. Materiál si navíc zachovává svou pevnost i v případech, kdy dochází k opakovanému mechanickému působení (např. vibrace nebo mikrodeformace vlivem teplotních změn).

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Deformační charakteristiky

HTPLA s příměsí mědi vykazuje vyšší prodloužení při přetržení (A_{end}), v průměru 7,65 %, zatímco PA12 CF15 se pohybuje v oblasti 2,47 %. To ukazuje na vyšší plasticitu HTPLA, která by teoreticky mohla lépe kompenzovat dilatace a pohyby střešní konstrukce, například způsobené tepelnou roztažností během dne a noci. Nicméně, tato vlastnost je u HTPLA vykoupena velmi nízkou pevností a také horší dlouhodobou stabilitou vůči UV záření a vlhkosti. HTPLA sice může částečně vyrovnávat tahová napětí díky své pružnosti, avšak v aplikacích, kde působí i krátkodobě vysoké síly (narázové zatížení, silný vítr, přimrzání a následné rozmrzání), hrozí plastičností podmíněné selhání – trvalá deformace nebo prasknutí.

Vhodnost pro střešní aplikaci PA12 CF15

Střešní konstrukce vytváří kombinaci mechanických a klimatických stresorů, jako jsou tepelná roztažnost, střídavé zatížení větrem a dlouhodobé působení UV záření a vlhkosti. PA12 CF15 tyto podmínky dobře zvládá díky vysoké pevnosti, tuhosti, rozměrové stabilitě a nízké nasákavosti. Tyto vlastnosti z něj činí vhodný materiál pro nosné a montážní prvky fotovoltaických systémů, protože poskytuje dostatečnou rezervu i pro mimořádné klimatické podmínky. Oproti tomu HTPLA–Cu je vhodnější jako doplňkový materiál pro komponenty, kde je prioritou možnost pokovení, nikoli nosnost.

Vhodnost pro střešní aplikaci Galvanicky pokovené a vyžíhaného HTPLA

HTPLA s příměsí mědi byl experimentálně testován pro použití ve funkčně specifických částech FVE, zejména tam, kde je třeba spojit konstrukční variabilitu 3D tisku s vodivostí. Po tisku a tepelném žihání byly díly upraveny pro galvanické pokovení – naněsli se vodivý grafitový nátěr a následně měděná vrstva. Takto upravené díly mohou sloužit např. jako kryty svorkovnic, stínící klece nebo vodivé spojky, kde plní funkci EMI stínění či vodivého propojení. V určitých aplikacích lze pokovený HTPLA využít i jako distanční nebo spojovací prvek s vodivostí v definovaném rozsahu. Je však třeba zohlednit, že samotný polymer nemá nosnou funkci a pokovená vrstva má omezenou tloušťku a proudovou zatížitelnost. Z tohoto důvodu se materiál hodí spíše pro nízkonapěťové a pomocné vodivé prvky, nikoliv pro silové spoje.

Tab. 3: Průměrné hodnoty povrchových odporů a průměrná vodivosti z pěti měřených vzorků.

Materiál	Průměrný povrchový odpor [Ω/sq]	Průměrná vodivost [S/m]
HTPLA (pokovené)	0,5300995	6865923,231
HTPLA–Cu (nepokovené)	606146,58	4,12404E-06
HTPLA–Cu (pokovené)	0,2495390	14275898,33

Literatura

- [1] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio et al.: *Overview on Additive Manufacturing Technologies*, Proceedings of the IEEE, 105 (2017), č. 4, s. 593–612.
- [2] A. Kafle, E. Luis, R. Silwal et al.: *3D/4D Printing of Polymers: FDM, SLS, and SLA*, Polymers, 13 (2021), č. 18.
- [3] S. Dul, L. Fambri, A. Pegoretti: *Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 85 (2016), s. 181–191.
- [4] F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, A. W. Basit: *Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines*, Int. J. Pharmaceutics, 529 (2017), č. 1–2, s. 285–293.

LITHIUM-ION BATTERY JOURNEY: FROM EXPERIMENT TO PRODUCTION PLANT

M. Šedina a T.Kazda

Ústav elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika

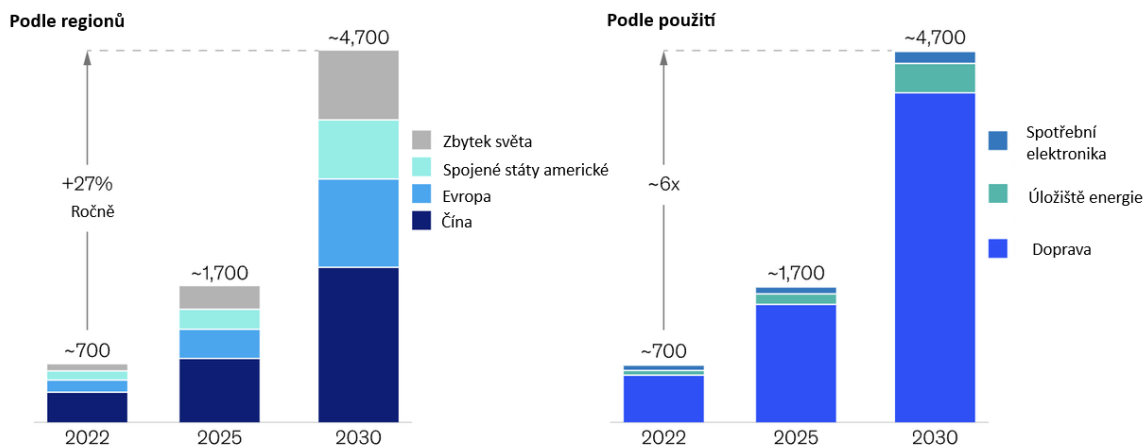
Abstract

Lithium-ion batteries are now a common part of our lives, used in phones, computers, and cars. Their importance is growing as we aim for cleaner transport and renewable energy sources. This paper briefly shows how Li-ion batteries develop from research in the lab to large-scale production. It describes how new technologies are developed and tested and how Li-ion batteries are made.

Úvod

Lithno-iontové (Li-ion) baterie dnes jdou dnes nezastupitelnou součástí našich životů. Nalezneme je v mobilních telefonech, laptopech, elektromobilech atd. Ještě před pár desítkami let šlo ale o technologii, kterou byste našli pouze ve výzkumných laboratořích. Dnes je to jedna z nejrychleji rostoucích oblastí průmyslu (viz Obr. 1). Rostoucí zájem o čistší dopravu, tlak na snižování emisí a přechod k obnovitelným zdrojům energie vedou ke stále větší potřebě spolehlivého ukládání elektrické energie, jako jeden z možných způsobů se jeví vhodné Li-ion akumulátory.

Elektromobilita zažívá obrovský boom, a to nejen díky technologickému pokroku, ale také díky politickým krokům, jako je plán Evropské unie Fit for 55, který má za cíl snížit emise skleníkových plynů členských států o 55 % do roku 2030. Díky tomuto se objevují masivní investice do vývoje a výroby baterií v členských státech, tak aby se omezila závislost na Asijských dodavatelích.

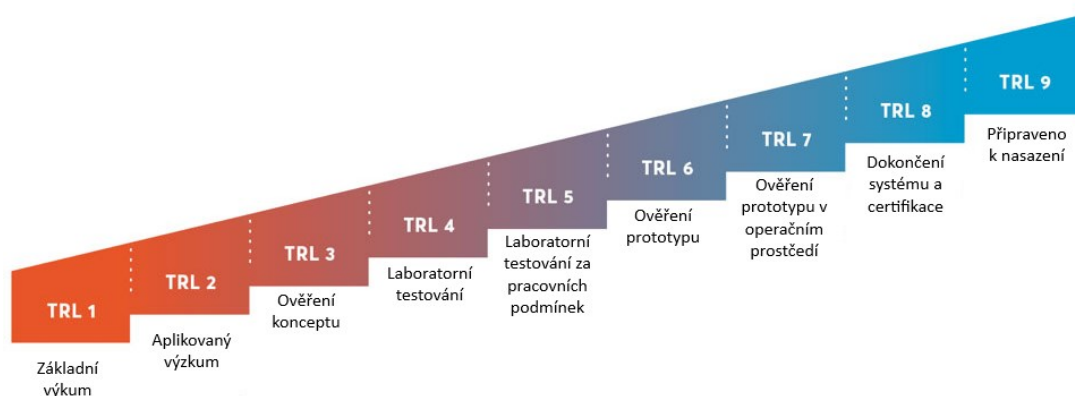


Obr. 1: Potřeby trhu Li-ion akumulátorů. [1]

Jak probíhá výzkum

Než se začne rozebírat rozdíl vývoje baterií v laboratorním prostředí a v produkci, je třeba si krátce říct něco o tom, jak probíhá výzkum produktu obecně. To, v jaké fázi se vývoj dané technologie se využívá hodnocení TRL (Úroveň technologické připravenosti), které vyvinulo NASA pro hodnocení svých projektů v 70. letech. Evropská unie převzala tento koncept v minulém desetiletí pro hodnocení všech evropských výzkumných projektů [2].

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 2: Popis úrovní TRL. [3]

TRL systém začíná ve fázích základního výzkumu, ze kterého postupně přechází až k vývoji, testování a komercializaci technologie (Obr.2). V úrovních TRL 1–3 se technologie, jejichž hlavním cílem je podpora vědecké práce a vývojových center, převážně ověřují základní principy technologie a vytváří se zde první prototypy na úrovni univerzit a výzkumných center. V úrovních TRL 4–6 se provádí ověřování technologií ve spolupráci s firmami, které se podílejí na jejím vývoji a testují ji v poloprovozních podmínkách. V posledních fázích TRL 7–9 přebírají primární roli firmy, které se zaměřují na finalizaci technologie, její testování v reálných podmínkách a přípravu na komerční nasazení a masovou výrobu.

Laboratoř vs Produkce

Výzkum na univerzitách a výzkumných centrech v oblasti Li-ion akumulátorů se zaměřuje na základní vědecké problémy a objevování nových technologií s cílem hlouběji porozumět elektrochemickým procesům, které řídí vlastnosti těchto akumulátorů. Výzkum se zaměřuje na studium nových elektrodových a elektrolytů s cílem dosáhnout zlepšení klíčových parametrů, jako jsou hustota energie, životnost a spolehlivost těchto akumulátorů. Na této úrovni probíhá testování různých alternativních cest k dosažení nových technologií. Výzkumné projekty jsou obvykle menšího rozsahu, prováděné v laboratorním prostředí s omezeným testovacím vybavením a minimálním přestupem do tvorby prototypů. Časový horizont těchto projektů bývá delší, protože ověřování nových konceptů a technologií vyžaduje čas. Je třeba také zmínit, že ani nalezení nějaké převratné technologie fungující v laboratorním prostředí neznamená její masovou výrobu, protože to co funguje v malém měřítku nemusí fungovat ve velkém měřítku masové výroby, tedy proces přípravy nebo využití materiálů není možné převést do sériového provozu.

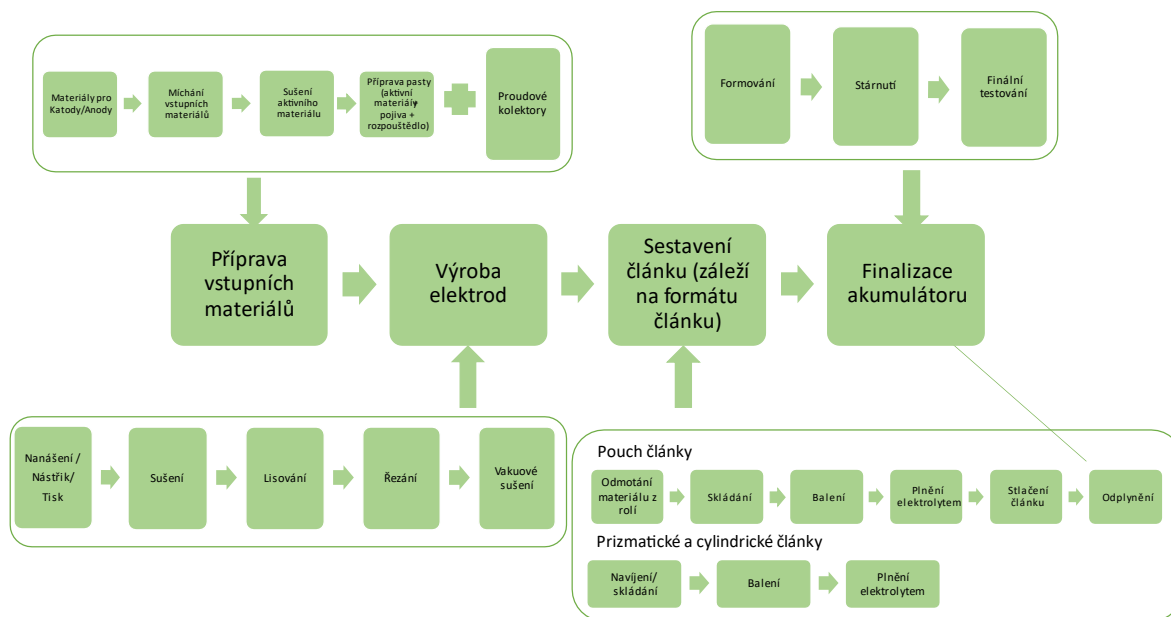
Naproti tomu výzkum a vývoj ve výrobě je především aplikovaný a úzce spojený s produkcí. Zde se inženýři a vědci zaměřují na optimalizaci stávajících technologií pro velkovýrobu, zvyšování účinnosti výrobních procesů, snižování nákladů na vyrobené množství baterií a zajištění vysoké kvality a spolehlivosti baterií vyráběných pro konkrétní aplikace, jako jsou elektromobily nebo úložiště energie. Cílem je rychlé zavedení ověřených inovací do výroby, zvýšení produkce a dosažení požadovaných parametrů baterií. Časový horizont je kratší, s důrazem na rychlé zavedení. Výzkum na této úrovni je již zaměřený na co nejvyšší úspěšnost, kdy se pracuje s technologiemi na úrovni TRL6, a proto se předpokládá rychlost výzkumu a kladný výsledek.

Proces výroby Li-ion akumulátoru

Výroba Li-ion baterií je složitý technologický proces skládající se z několika hlavních kroků. Jako první probíhá příprava elektrod, při níž se smíchají aktivní materiály po anodu a katodu s vodivými příměsami a pojiva. Tento prášek se následně rozmíchá v rozpouštědle a vznikne tak pasta, která je následně nanášena na kovové proudové kolektory (hliník pro katodu, měď pro anodu). Takto nanášená pasta je poté vysušena a zalisována, tak aby se dosáhlo optimální hustoty a tloušťky. V další fázi výroby článku se elektrody a separátor (polymerní folie) rozřežou na požadované rozměry. Poté se složí do požadovaného tvaru článku (rolování pro cylindrické a prizmatické články a stohování pro prizmatické a pouch články). Následně se vloží do obalu a naplní se elektrolytem. Článek je poté hermeticky uzavřen s možností odplynění. Následuje proces formování, během kterého se články poprvé nabíjejí a vybíjejí, což vede k vytvoření pasivační SEI vrstvy (solid electrolyte interface) na povrchu anody, která je zásadní pro stabilitu akumulátoru. Po tomto cyklu proběhne stárnutí, při kterém se články nechají odpočívat, tak aby proběhla chemická stabilizace článku, již během toho. Závěrečná fáze zahrnuje finální testování, při které se měří kapacita, vnitřní odpor a rychlost samovybíjení a další požadované parametry. Co se týče kontroly kvality článků a jejich vyřazování, tak to probíhá již od kroku formátování, od kterého jsou všechny články bedlivě sledovány a články s nestandardním chováním jdou na recyklaci [4]. Postup výroby je schematicky vyobrazen na Obr. 3.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tento postup se shoduje jak pro laboratorní testování v malém měřítku, tak pro postup ve velkých továrnách, rozdíl je ovšem ve vybavení, které se pro dané činnosti používá. Dalším rozdílem může být také to, že pro výzkum materiálů se typicky neskládá celá baterie, ale tzv. půl články, kdy se zkoumaný materiál měří proti kovovému lithiu a taktéž rozměry a formáty článků bývají menší obvykle ve velikosti mincových článků.



Obr. 3: Popis výroby Li-ion akumulátoru.

Závěr

Z již zmíněných informací vyplývá, že cesta z laboratoře do produkce je zdlouhavá. Běžná doba, kdy nějaký produkt přejde od základního výzkumu k aplikaci je zhruba 11 let. To dobře reprezentují technologie článku LCO, která byla vynalezena v roce 1980 a komerčně vyráběna firmou Sony od roku 1991 nebo články LFP, které byly objeveny v roce 1996 a začaly se vyrábět okolo roku 2006. Pokud se k tomu ještě připočte samotný začátek primárního výzkumu po vzniku publikace daného průlomu, můžeme k danému času připočítat i několik let. Proto jsou evoluce Li-ion akumulátorů spíše pozvolné a ne příliš skokové.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (č.FEKT-S-23-8286).

Literatura

- [1] H. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular, 2023. In: McKinsey & Company [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>
- [2] About Technology Readiness Levels. European Commission [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://euraxess.ec.europa.eu/career-development/researchers/manual-scientific-entrepreneurship/major-steps/trl>
- [3] Čo je to stupnica TRL alebo úroveň pripravenosti technológie?, 2021. In: Grant UP [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://grantup.sk/co-je-to-stupnica-trl-alebo-uroven-pripravenosti-technologie/>
- [4] How Are Lithium-ion Batteries Manufactured? Kadant [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://dcf.kadant.com/en/how-are-lithium-ion-batteries-manufactured>

SOUČASNÝ STAV KOMERČNÍCH SODNO-IONTOVÝCH BATERIÍ: MATERIÁLY, TECHNOLOGIE A BUDOUCÍ SMĚŘOVÁNÍ

A. Šimek, T. Kazda a O. Čech

*Ústav elektrotechnologie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení
technické v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika*

Abstract

Sodium-ion (Na-ion) batteries are becoming a promising alternative to lithium-ion technology, especially for applications where cost, resource availability, sustainability and safety are critical factors. This review provides a comprehensive overview of the current state of commercial Na-ion battery development, focusing on key materials, technological advances and commercial readiness. Cathode materials such as layered oxides and Prussian blue analogues, along with hard carbon as the main anode material, are discussed in terms of performance, scalability and limitations. The status of major industry players and pilot scale production efforts are discussed and current challenges such as limited energy density are identified. The review concludes by outlining future directions in materials optimization, sustainability, and integration into grid storage and electromobility that position Na-ion batteries as a viable complement to lithium-based systems in an evolving energy landscape.

Úvod

Rostoucí poptávka po udržitelném a nákladově efektivním skladování energie podnítila značný zájem o sodno-iontové (Na-ion) baterie jako alternativu k lithno-iontovým (Li-ion) systémům. Zatímco Li-ion baterie v současné době dominují trhu díky své vysoké hustotě energie a ověřené technologii, obavy ohledně dostupnosti zdrojů lithia, nákladů a geopolitickému rozložení klíčových surovin a jejich zpracovatelských kapacit zdůraznily potřebu alternativních technologií [1]. Na-ion baterie nabízejí několik výhod, včetně dostupnosti a nízké ceny sodíku, vyšší bezpečnosti a lepšího výkonu při nízkých teplotách. Ačkoli mají Na-ion systémy obecně nižší gravimetrickou hustotu energie (100-160 Wh/kg) ve srovnání s Li-ion (150-280 Wh/kg) a nižší provozní napětí, jsou stále více považovány za vhodné pro aplikace, jako jsou stacionární úložiště energie a levná elektromobilita, kde jsou rozhodující náklady a udržitelnost zdrojů [2].

Výzkum Na-ion baterií stále probíhá a neustále se objevují nové materiály a technologie pro jejich zdokonalení. Na straně katody se ovšem prosadily materiály jako analogy pruské modři (Prussian Blue Analogues – PBA, neboli materiály na bázi ferrikyanidu), vrstevnaté oxidy přechodných kovů (Layered Transition Metal Oxides) a polyanionické sloučeniny (Polyanionic Compounds) a to díky jejich stabilitě a struktuře schopné pojmout sodné ionty [3]. V oblasti anodových materiálů dominuje tvrdý uhlík (Hard Carbon), který nabízí dobrou reverzibilní kapacitu a díky své amorfní struktuře kombinaci interkalačních mechanismů, mechanismů vyplňování pórů a adsorpci [4; 5]. Elektrolyty se obvykle skládají z organických rozpouštědel, jako je ethylen karbonát a propylen karbonát, v kombinaci se sodnými solemi, jako je NaPF_6 (hexafluorfosforečnan sodný) nebo NaClO_4 (chloristan sodný). Současně pak probíhá výzkum vodných a solid-state alternativ, jako je tomu u Li-ion baterií. Tyto materiály společně umožňují konkurenceschopný výkon při zachování ekonomických a ekologických výhod, které z Na-ion baterií činí přesvědčivou technologii skladování energie nové generace.

Přehled společností zabývajících se vývojem a výrobou Na-ion baterií

Na-ion baterie se z perspektivního výzkumného tématu staly v posledních několika letech komerčně dostupnou technologií. Několik společností uvedlo na trh své produkty a další se snaží vstoupit na trh. Níže je uvedeno několik klíčových společností figurujících v oblasti výroby a výzkumu Na-ion baterií:

- Čínská společnost **CATL**, světový lídr v oblasti baterií, představila v roce 2021 svou první generaci Na-ion baterií a spolupracuje se společností Chery na integraci těchto baterií do elektromobilů [6]. CATL využívá pro Na-ion baterie katodový materiál na bázi PBA a porézní uhlík jako anodu. Dále pak uvádí, že jejich baterie dosahují energetické hustoty až 160 Wh/kg. V březnu 2025 pak společnost CATL zveřejnila informace o druhé generaci Na-ion baterií, které mají dosahovat energetické hustoty až 200 Wh/kg a mají být schopné vybíjení až při teplotách $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato nová generace by měla dorazit na trh již v roce 2025 a hromadná produkce by měla být zahájena v roce 2027. [7; 8]

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

- **HiNa Battery Technology**, spin-off Čínské akademie věd, již nasadila Na-ion baterie v elektromobilu Sehol E10X a nabízí cylindrické a prismatické články s hustotou energie až 140 Wh/kg pro cylindrické a 155 Wh/kg pro prismatické. Tyto baterie využívají jako katodový materiál oxid přechodných kovů na bázi Na-Fe-Mn-Cu a amorfni uhlík na bázi uhlí (antracit) jako anodový materiál. [9]
- Společnost **Natron Energy** jako spin off Stanfordské univerzity plánuje vybudovat v Severní Karolíně továrnu za 1,4 miliardy dolarů s kapacitou 24 GWh, která bude vyrábět Na-ion baterie pro průmyslové aplikace, jako jsou datová centra a infrastruktura pro rychlé nabíjení elektromobilů. Tyto baterie mají využívat PBA katodový materiál na straně anody i katody a vodný elektrolyt. Na výrobě aktivního materiálu s nimi spolupracuje česká společnost Draslovka Kolín, kde by výroba pruské modři měla být zahájena v roce 2026. [10; 11]
- Britská společnost **Faradion**, předvedla Na-ion baterie využívající katody z vrstevnatých oxidů přechodných kovů pro elektrokola a skútry a spolupracuje se společností AMTE Power na rozšíření výroby. Jejich baterie dosahují energetické hustoty 160 Wh/kg v pouch baterii o kapacitě 32 Ah. Budoucí generace jejich baterií pak slibuje energetickou hustotu až 190 Wh/kg. [12]
- Švédská společnost **Altris AB** byla založena v roce 2017 jako spin-off z Univerzity v Uppsale. První výzkum probíhal v rámci Ångström Advanced battery Centre (ÅABC) pod vedením profesorky Kristiny Edström. Společnost Altris vyvíjí vlastní katodový materiál na bázi PBA (Prussian White), jako anodový materiál využívají tvrdý uhlík. Cílem společnosti Altris AB je také zajištění nehořlavosti Na-ion baterií využitím elektrolytu na bázi NaBOB a dále také zvýšení ekologičnosti tím, že nevyužívají fosfor a jeho sloučeniny. Na výrobě článků spolupracují se společnostmi jako Clarios a Northvolt. [13; 14]
- Francouzská společnost **Tiamat Energy**, kterou podporuje Stellantis Ventures, se zaměřuje na výrobu cylindrických Na-ion baterií 18650, které se zaměřují na použití v elektrickém nářadí. Dále pracuje na prismatických člancích pro stacionární úložiště, a plánuje rozšíření na elektrická vozidla. Společnost Tiamat využívá ve svých bateriích jako katodový materiál polyanionickou sloučeninu NVP (Sodium Vanadium Phosphate) a jako anodový materiál tvrdý uhlík čímž dosahuje energetické hustoty 100-120 Wh/kg. [15]

Tento vývoj naznačuje rychle rostoucí zájem o Na-ion technologii a investice do ní, což ji staví do pozice konkurenceschopné alternativy na globálním trhu s bateriemi. V tabulce č. 1 je uvedeno shrnutí jednotlivých společností zabývajících se výrobou a vývojem Na-ion baterií včetně použitých anodových a katodových materiálů a jejich aktuálnímu stavu. Za povšimnutí stojí fakt, že většina výrobců využívá právě tvrdý uhlík (amorfni) jako anodový materiál, a to z toho důvodu, že je cenově dostupný, je možné ho ekologicky vyrábět například spalováním biomasy a dosahuje teoretické kapacity 250-350 mAh/g (podle typu zpracování). Hlavní rozdíl mezi výrobci je tedy ve výsledném formátu baterie a v použitém katodovém materiálu a elektrolytu.

Tab. 1: Shrnutí hlavních světových výrobců Na-ion baterií a jimi využívané elektrodové materiály. [9-13]

Název společnosti	Země	Katodový materiál	Anodový materiál	Stav
CATL	China	Prussian Blue	Tvrdý uhlík	Komerční produkce
HiNa Battery	China	Vrstevnatý oxid Na-Fe-Mn-Cu	Amorfni uhlík na bázi uhlí (antracit)	Komerční produkce
Natron Energy	USA	Prussian Blue* $\text{Na}_{0,7}\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	Prussian Blue* $\text{Na}_2\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	Pilotní produkce
Faradion	UK/Indie	Vrstevnatý oxid	Tvrdý uhlík	Pilotní produkce
Altris AB	Švédsko	Prussian White	Tvrdý uhlík	R&D a prototypování
Northvolt	Švédsko	Prussian White	Tvrdý uhlík	Vývojová fáze
Tiamat Energy	Francie	Polyanionická sloučenina NVP	Tvrdý uhlík	Pilotní produkce

*Společnost Natron Energy používá asymetrický systém s využitím katodového materiálu PBA. Mezi anodou a katodou je od začátku rozdíl v úrovni sodiace.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Závěr

V posledních letech došlo k výraznému posunu ve vývoji Na-ion baterií – z technologie, která byla ještě nedávno pouze ve fázi výzkumu, se postupně stává reálná alternativa k Li-ion systémům. Na trhu se začínají objevovat první komerční produkty a stále více společností, včetně několika evropských, se aktivně zapojuje do vývoje a výroby Na-ion článků. To představuje příležitost pro posílení evropské soběstačnosti, omezení závislosti na asijských dodavatelských řetězcích a lepší geopolitické rozložení výroby baterií. Zároveň je důležité zmínit, že současná energetická hustota sodíkových baterií je již srovnatelná s LFP technologií v Li-ion člancích, což z nich činí atraktivní volbu pro aplikace, kde je klíčová bezpečnost, dostupnost surovin a nízké náklady.

Poděkování

Tato práce byla podpořena specifickým vysokoškolským výzkumem VUT v Brně č. FEKT-S-23-8286.

Literatura

- [1] J. Y. Hwang et al., “Sodium-ion batteries: present and future”, *Chemical Society Reviews*, vol. 46, no. 12, 2017, doi: 10.1039/C6CS00776G.
- [2] N. Tapia-Ruiz et al., “2021 roadmap for sodium-ion batteries”, *Journal of Physics: Energy*, vol. 3, no. 3, Jul. 2021, doi: 10.1088/2515-7655/ac01ef.
- [3] M. He et al., “Review of cathode materials for sodium-ion batteries”, *Progress in Solid State Chemistry*, no. 74, 2024, <https://1url.cz/2J1me>
- [4] N. Sun et al., “Understanding of Sodium Storage Mechanism in Hard Carbons: Ongoing Development under Debate”, *Advanced Energy Materials*, vol. 12, no. 27, 2022, doi: 10.1002/aenm.202200715.
- [5] T. Perveen et al., “Prospects in anode materials for sodium ion batteries - A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109549.
- [6] “CATL's First Sodium-ion Battery to Power Chery EV Models”, *CATL*, 02023. <https://1url.cz/oJucS>
- [7] “CATL launches condensed battery with an energy density of up to 500 Wh/kg, enables electrification of passenger aircrafts”, 2023. <https://www.catl.com/en/news/6015.html>
- [8] G. Bockey, “CATL to Produce Second-Generation Sodium-Ion Battery”, *Battery-News*. <https://battery-news.de/en/2025/03/18/catl-to-produce-second-generation-sodium-ion-battery/>
- [9] “Hina Battery Becomes 1st Battery Maker to Put Sodium-ion Batteries in Evs in China”, *Batteries News*. <https://1url.cz/5J1mo>
- [10] J. Ennes, “Sodium ion set to impact thriving US battery market”, *Reuters*, 2024. <https://1url.cz/6Jucf>
- [11] Ondřej Souček, “Draslovka investuje miliardu do byznysu baterií nové generace. V Kolíně bude vyrábět klíčovou surovinu”, *E15.cz*. <https://1url.cz/zJ1mH>
- [12] “Technology benefits-Strong Performance”, *Faradion*. <https://1url.cz/qJuc0>
- [13] “Major successes for Uppsala University researchers’ battery material”, *Uppsala University*, 02022. <https://1url.cz/ZJucZ>
- [14] “Clarios and Altris announce collaboration agreement to advance sustainable sodium-ion battery technology”, *Clarios*, 02024. <https://1url.cz/lJucd>
- [15] “TIAMAT Sodium-ion battery”, *TIAMAT*. <https://www.tiamat-energy.com/>

INSTRUMENTACE PRO IN-SITU/OPERANDO SEM ANALÝZU LI-ION AKUMULÁTORŮ

D. Trochta^{1,2}, O. Klvač^{1,2}, L. Novák² a T. Kazda¹

1 Ústav elektrotechnologie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika

2 Thermo Fisher Scientific Brno, Vlastimila Pecha 12, 627 00, Brno, Česká republika

Abstract

In-situ and operando scanning electron microscopy (SEM) enables direct observation of morphological and structural changes in lithium-ion battery components during electrochemical cycling. This paper presents an overview of the instrumental requirements for performing such experiments, including the selection of electron sources, detectors, and auxiliary modules such as heating stages and micromanipulators. Special attention is given to electrochemical control using external potentiostats and the design of sample holders compatible with scanning electron microscopy. Two primary electrochemical cell configurations open and sealed/liquid are compared in terms of resolution, electrolyte compatibility, and ease of assembly. The aim of this work is to summarize the key instrumental considerations for enabling real-time SEM observation of battery degradation phenomena.

Úvod

Rostoucí poptávka po výkonnějších a spolehlivějších lithno-iontových (Li-ion) akumulátorech zvyšuje nároky na detailní porozumění degradačním mechanismům, které ovlivňují jejich životnost, bezpečnost a výkon [1]. Jedním z klíčových nástrojů pro studium těchto jevů v reálném čase je in-situ a operando rastrovací elektronová mikroskopie (SEM), která umožňuje sledovat degradační mechanismy přímo během elektrochemického cyklování v reálném čase, bez nutnosti přerušování experimentu nebo ex-situ manipulace se vzorkem [2].

In-situ/operando SEM umožňuje například sledovat vznik a vývoj SEI vrstvy (solid electrolyte interface), růst dendritů, porušení mechanické integrity elektrod, nebo změny v krystalové orientaci materiálu. Aby však bylo možné tyto procesy efektivně zachytit, je nutné přizpůsobit jak samotný elektronový mikroskop, tak i elektrochemické aspekty celého experimentu. Výběr vhodného elektronového zdroje, detektorů, přídatných modulů a přípravků, způsobu kontaktování vzorku i konstrukce elektrochemické cely hraje zásadní roli pro kvalitu a spolehlivost získaných dat. [2; 3]

Tento konferenční příspěvek se zaměřuje na praktické a technické aspekty instrumentace SEM pro in-situ/operando studium Li-ion akumulátorů. Pozornost je věnována především detekčním systémům, elektrochemickému řízení, podpůrnému příslušenství a konstrukčním variantám elektrochemických cel vhodných pro měření v prostředí elektronového mikroskopu.

Vybavení SEM pro in-situ/operando analýzu Li-ion akumulátorů

Rastrovací elektronová mikroskopie je technika, která umožňuje získávat detailní obraz povrchu vzorku pomocí fokusovaného svazku elektronů. Ten interaguje s materiálem a generuje celou řadu signálů, zejména však sekundární (SE) a zpětně rozptýlené elektrony (BSE), jejichž detekci lze získat informace o morfologii, topografii a částečně i chemickém složení povrchu. Mezi hlavní výhody SEM patří vysoké prostorové rozlišení, velká hloubka ostrosti a možnost kombinace s analytickými metodami, jako je například energiově disperzní spektroskopie (EDS). [4]

Na rozdíl od ex-situ měření, která poskytují jen statický pohled na změny během cyklování, vyžaduje in-situ/operando přístup úzkou integraci elektronové mikroskopie s elektrochemickým řízením a speciálně navrženou měřicí celou. SEM zde neplní pouze roli zobrazovacího nástroje, ale stává se součástí dynamického systému, kde jsou klíčové i stabilita svazku, citlivost a minimalizace interakcí se vzorkem. [2; 3]

Zásadní roli v kvalitě pozorování a výsledných snímků hraje typ elektronového zdroje. Pokud je cílem dosažení vysokého prostorového rozlišení, je vhodné zvolit mikroskop vybavený autoemisním zdrojem elektronů (FEG – Field Emission Gun). Tento typ zdroje poskytuje vysoce koherentní a stabilní svazek s velmi malým průměrem, což umožňuje kvalitní zobrazení i při nízkých urychlovacích napětích. FEG zdroje jsou proto výhodné nejen pro in-situ pozorování akumulátorů, ale obecně ve všech aplikacích, kde je kladen důraz na detailní morfologickou analýzu a maximální rozlišení. [4]

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Výslednou kvalitu obrazu zásadně ovlivňuje také typ použitých detektorů. Kromě běžného detektoru sekundárních elektronů (ETD – Everhart Thornley detector), který poskytuje základní topografické informace, se v in-situ aplikacích často využívají in-lens detektory. Ty umožňují detekovat nízkoenergetické elektrony s vyšší citlivostí a přispívají k lepšímu kontrastu i prostorovému rozlišení. Pro určení chemického složení vzorku se používá EDS detektor, který umožňuje identifikaci prvků a jejich množství. Běžné EDS detektory však nedokážou detekovat lehké prvky, jako je lithium ($Z = 3$), proto je pro jeho analýzu nutné použít tzv. „bezokenní“ variantu detektoru, která není vybavena okénkem, které by pohlcovalo signály s nízkou energií. [4; 5]

Dalším užitečným nástrojem pro strukturální analýzu je EBSD (elektronová difrakce zpětně rozptýlených elektronů) a k tomu určený detektor, který umožňuje sledování změn v krystalové orientaci, detekci fázových transformací nebo lokalizovaných napětí ve struktuře elektrody s vysokým prostorovým rozlišením. Tato metoda poskytuje detailní mapy orientace zrn a krystalografických změn v čase a je zvláště cenná při studiu deformačních jevů, mechanických deformací aktivních materiálů nebo poruch vazby mezi částicemi v elektrodové matici. [6]

In-situ/operando měření akumulátorů vyžadují kromě samotného mikroskopu také elektrochemické měření, které zajišťuje potenciostat nebo galvanostat. Tyto přístroje umožňují přesné řízení napětí nebo proudu a současně zaznamenávání elektrochemické odezvy. Pro zajištění stabilního a reprodukovatelného připojení k elektrochemickému článku je nezbytné vhodné elektrické propojení, často pomocí k tomu určených sond nebo specializovaných držáků [2; 3]. Mikromanipulátory mohou také sloužit jako proudové či potenciálové sondy, ale především se využívají k preciznímu polohování elektrod, kontaktování specifických oblastí vzorku a jemné mechanické manipulaci během montáže nebo úpravy elchem. článku přímo v komoře mikroskopu [7; 8]. Pro rozšíření funkčnosti mikroskopu lze dále využít topné a chladicí stoly pro sledování teplotně závislých procesů [9], systémy pro vstřikování plynů pro simulaci atmosférických podmínek uvnitř článku [10], nebo přenosové komory a systémy, umožňující transport vzorků v ochranné atmosféře bez vystavení vzduchu [3].

Konfigurace elektrochemických cel

Volba vhodné konfigurace elektrochemického celu je zásadní pro úspěšné provedení in-situ/operando SEM měření. Různé konstrukční typy cel ovlivňují nejen typ elektrolytu, který lze použít, ale i stabilitu měření, dosažitelné rozlišení a možnost sledovat konkrétní jevy, jako je tvorba SEI vrstev či morfologické změny během cyklování [2]. Výběr konstrukce tak závisí na prioritách konkrétního experimentu – například zda je cílem sledovat elektrody v co nejvyšším rozlišení, nebo zachytit děje v běžně používaných elektrolytech. V současnosti se nejčastěji používají dvě základní konfigurace cel: otevřené (open-cell) a uzavřené (sealed/liquid-cell). Každá z nich má své výhody i nevýhody, a jejich správné použití vyžaduje zohlednění fyzikálně-chemických vlastností použitých materiálů i podmínek mikroskopie. [8; 11; 3]

Otevřené cely se vyznačují jednoduchostí konstrukce a snadnou manipulací. Nevýhodou však je přímé vystavení celého systému prostředí mikroskopu, typicky vysokému vakuu. Z tohoto důvodu nelze v otevřených celách použít běžné kapalně elektrolyty na bázi organických rozpouštědel, protože nejsou kompatibilní s vakuem a rychle se vypaří. Otevřená konfigurace je tak vhodná zejména pro systémy s pevným elektrolytem nebo elektrolyty na bázi iontových kapalin, které jsou stabilní i při nízkém tlaku [8]. Hlavní výhodou této varianty je možnost dosažení velmi vysokého prostorového rozlišení. Při použití nízko-vakuového režimu (low-vacuum mode) nebo environmentálního SEM (ESEM) je možné mírně potlačit nabíjení vzorku nebo se přiblížit reálným provozním podmínkám, většinou však za cenu určité ztráty kvality obrazu. [12; 3]

Na druhou stranu, uzavřené cely umožňují použití běžných elektrolytů. Elektrochemické děje je zde možné sledovat přes tenké pozorovací okénko, obvykle ze SiN (nitrid křemíku), které odděluje vnitřní prostředí akumulátoru od prostředí mikroskopu (vakua). Tato konfigurace je výhodná např. pro sledování vzniku a vývoje SEI vrstvy v běžně využívaných elektrolytech. Mezi hlavní nevýhody však patří snížené prostorové rozlišení způsobené pozorovacím okénkem, náročná příprava vzorku a nemožnost úpravy systému po hermetickém uzavření. Navíc může pod pozorovacím oknem vzniknout vrstva elektrolytu, která znemožní kvalitní zobrazení povrchu elektrody, a kvůli uzavřené konstrukci lze tento přebytečný elektrolyt jen náročně odstranit. [11; 13]

Závěr

Použití in-situ a operando technik v kombinaci s rastrovací elektronovou mikroskopií přináší nové možnosti pro detailní studium fyzikálně-chemických procesů probíhajících v Li-ion akumulátorech během jejich provozu. Schopnost sledovat změny v reálném čase bez nutnosti ex-situ manipulace umožňuje lépe porozumět deformačním mechanismům, jako je tvorba SEI vrstvy, růst dendritů, nebo mechanické poškození elektrod. Výsledky těchto pozorování hrají klíčovou roli při návrhu nových materiálů a optimalizaci konstrukce článků.

Tento příspěvek poskytl přehled základních požadavků na instrumentaci pro in-situ/operando měření, včetně výběru vhodného elektronového zdroje, detekční techniky, elektrochemického řízení a podpůrného vybavení. Pozornost byla věnována také konstrukčním variantám elektrochemických cel, které zásadním způsobem ovlivňují kvalitu měření a použitelnost běžných elektrolytů v prostředí elektronového mikroskopu.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Zavádění těchto metod do běžné laboratorní praxe přináší nejen nové poznatky, ale také výzvy spojené s konstrukcí držáků, těsněním, elektrickým propojením nebo stabilitou článku během měření. Přes tyto komplikace je zřejmé, že in-situ/operando SEM se stává nezastupitelným nástrojem moderního materiálového výzkumu a jeho význam bude v kontextu vývoje pokročilých bateriových systémů a akumulátorů dále narůstat.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (č. FEKT-S-23-8286) a ve spolupráci s firmou Thermo Fisher Scientific Brno.

Literatura

- [1] CHO, Hyukhee, Joonchul KIM, Minseon KIM, Hyunjin AN, Kyoungmin MIN a Kwangjin PARK. A review of problems and solutions in Ni-rich cathode-based Li-ion batteries from two research aspects: Experimental studies and computational insights. *Journal of Power Sources* [online]. 2024, 597 [cit. 2025-04-10]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2024.234132
- [2] ZHOU, Shiyuan, Kaige LIU, Yifan YING, Linzhi CHEN, Guilin MENG, Qizheng ZHENG, Shi-Gang SUN a Hong-Gang LIAO. Perspective of operando/in situ scanning electron microscope in rechargeable batteries. *Current Opinion in Electrochemistry* [online]. 2023, 41 [cit. 2025-04-10]. ISSN 24519103. Dostupné z: doi:10.1016/j.coelec.2023.101374
- [3] WU, Jimmy, Michael FENECH, Richard F. WEBSTER, Richard D. TILLEY a Neeraj SHARMA. Electron microscopy and its role in advanced lithium-ion battery research. *Sustainable Energy & Fuels* [online]. 2019, 2019-06-25, 3(7), 1623-1646 [cit. 2025-04-10]. ISSN 2398-4902. Dostupné z: doi:10.1039/C9SE00038K
- [4] KOGURE, T. Electron Microscopy. In: *Handbook of Clay Science* [online]. Elsevier, 2013, s. 275-317 [cit. 2025-04-10]. *Developments in Clay Science*. ISBN 9780080993645. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-098259-5.00011-1
- [5] WU, Jimmy, Michael FENECH, Richard F. WEBSTER, Richard D. TILLEY a Neeraj SHARMA. Electron microscopy and its role in advanced lithium-ion battery research. *Sustainable Energy & Fuels* [online]. 2019, 2019-06-25, 3(7), 1623-1646 [cit. 2025-04-10]. ISSN 2398-4902. Dostupné z: doi:10.1039/C9SE00038K
- [6] QUINN, Alexander, Helio MOUTINHO, Francois USSEGLIO-VIRETTA, Ankit VERMA, Kandler SMITH, Matthew KEYSER a Donal P. FINEGAN. Electron Backscatter Diffraction for Investigating Lithium-Ion Electrode Particle Architectures. *Cell Reports Physical Science* [online]. 2020, 1(8) [cit. 2025-04-10]. ISSN 26663864. Dostupné z: doi:10.1016/j.xcrp.2020.100137
- [7] PENG, L.-M., Q. CHEN, X.L. LIANG, S. GAO, J.Y. WANG, S. KLEINDIEK a S.W. TAI. Performing probe experiments in the SEM. *Micron* [online]. 2004, 35(6), 495-502 [cit. 2025-04-10]. ISSN 09684328. Dostupné z: doi:10.1016/j.micron.2003.12.005
- [8] CHEN, Di, Sylvio INDRIS, Michael SCHULZ, Benedikt GAMER a Reiner MÖNIG. In situ scanning electron microscopy on lithium-ion battery electrodes using an ionic liquid. *Journal of Power Sources* [online]. 2011, 196(15), 6382-6387 [cit. 2025-04-10]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2011.04.009
- [9] MELE, Luigi, Stan KONINGS, Pleun DONA, Francis EVERTZ, Christoph MITTERBAUER, Pybe FABER, Ruud SCHAMPERS a Joerg R. JINSCHKE. A MEMS -based heating holder for the direct imaging of simultaneous in-situ heating and biasing experiments in scanning/transmission electron microscopes. *Microscopy Research and Technique* [online]. 2016, 79(4), 239-250 [cit. 2025-04-10]. ISSN 1059-910X. Dostupné z: doi:10.1002/jemt.22623
- [10] ZHENG, Hao, Dongdong XIAO, Xing LI, et al. New Insight in Understanding Oxygen Reduction and Evolution in Solid-State Lithium–Oxygen Batteries Using an in Situ Environmental Scanning Electron Microscope. *Nano Letters* [online]. 2014, 2014-08-13, 14(8), 4245-4249 [cit. 2025-04-10]. ISSN 1530-6984. Dostupné z: doi:10.1021/nl500862u
- [11] QIU, Yongcai, Genlan RONG, Jie YANG, et al. Highly Nitridated Graphene–Li 2 S Cathodes with Stable Modulated Cycles. *Advanced Energy Materials* [online]. 2015, 5(23) [cit. 2025-04-10]. ISSN 1614-6832. Dostupné z: doi:10.1002/aenm.201501369
- [12] TSUDA, Tetsuya, Kei HOSOYA, Teruki SANO a Susumu KUWABATA. In-situ scanning electron microscope observation of electrode reactions related to battery material. *Electrochimica Acta* [online]. 2019, 319, 158-163 [cit. 2025-04-10]. ISSN 00134686. Dostupné z: doi:10.1016/j.electacta.2019.06.165
- [13] RAIMANN, P. R., N. S. HOCHGATTERER, C. KOREPP, K. C. MÖLLER, M. WINTER, H. SCHRÖTTNER, F. HOFER a J. O. BESENHARD. Monitoring dynamics of electrode reactions in Li-ion batteries by in situ ESEM. *Ionics* [online]. 2006, 2006-11-17, 12(4-5), 253-255 [cit. 2025-04-10]. ISSN 0947-7047. Dostupné z: doi:10.1007/s11581-006-0046-y

VLIV ROZLIŠENÍ ZÁTĚŽOVÉHO PROFILU NA SIMULACI PODÍLU VLASTNÍ SPOTŘEBY FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY

J. Vaněk^{1,2} a P. Maule^{1,3}

¹ Ústav elektrotechnologie, FEKT., Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, 612 00 Brno

² Katedry elektrotechniky Fakulta vojenských technologií Univerzita obrany

³ Česká fotovoltaická asociace, Teslova 1202/3, 301 00 Plzeň

Abstract

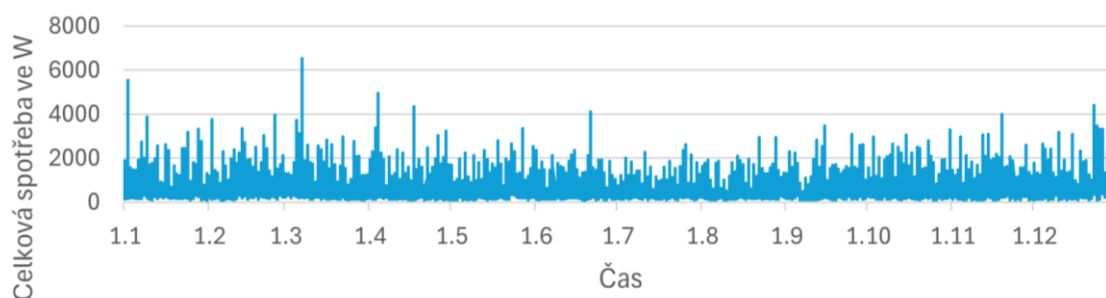
*This paper studies the modeling accuracy of small-scale solar systems, in particular the effect of changing the time resolution in the PV*SOL simulation environment. Accurate modelling of solar energy systems is important in designing cost-effective solutions and in researching the functionality of microgrids. Currently, the modeling mostly uses a resolution of one hour when simulating energy in small-scale renewable energy systems. Within each hour, these models take the average values of load demand and solar power generation. The hourly time resolution ignores the large amounts in the daily load profile that result from the high-power output of appliances, and also neglects the short-term fluctuations in PV generation load. In this paper, 4 load profiles are modeled with grid-connected solar systems with battery storage.*

Úvod

Přesné modelování solárních energetických systémů je důležité při navrhování nákladově efektivních řešení a při výzkumu funkčnosti sítí. V současné době se při modelování většinou používá rozlišení jedné hodiny při simulaci energie v malých systémech obnovitelné energie. V rámci každé hodiny tyto modely berou průměrné hodnoty poptávky po zátěži a výroby solární energie. Hodinové časové rozlišení ignoruje velké množství v denním profilu zatížení, které jsou důsledkem vysokého výkonu spotřebičů, a také opomíjí krátkodobé výkyvy v zatížení fotovoltaické výroby. V tomto článku jsou modelovány 4 zátěžové profily se solárními systémy připojenými k síti s bateriovým úložištěm.

Simulace

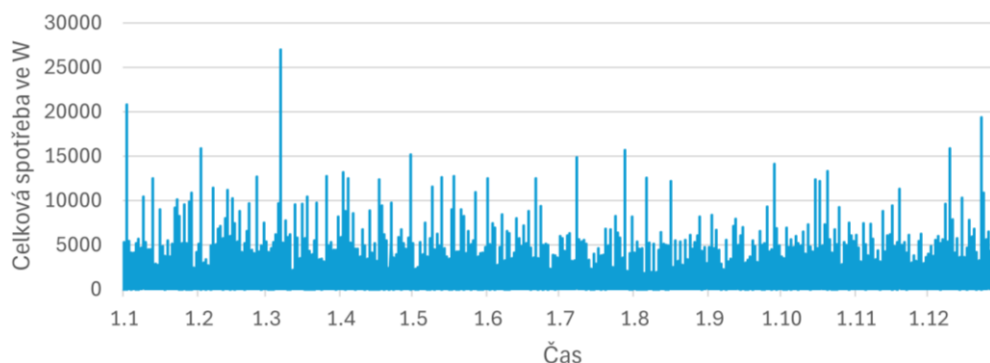
Zdroj dat pro zátěžový profil byl použitý zátěžový profil pro domácnost s ročním průběhem srovnatelným se standardním zátěžovým profilem vytvořený v HTW Berlín na univerzitě aplikovaných věd z dat profilů obytných budov v Německu s časovým rozlišením jedné sekundy převedený na rozlišení jedné minut s roční spotřebou 5010 kWh a špičkovou zátěží 27 kW, která se v tomto profilu objevila po dobu jedné minuty 7. března v čase 9:53.



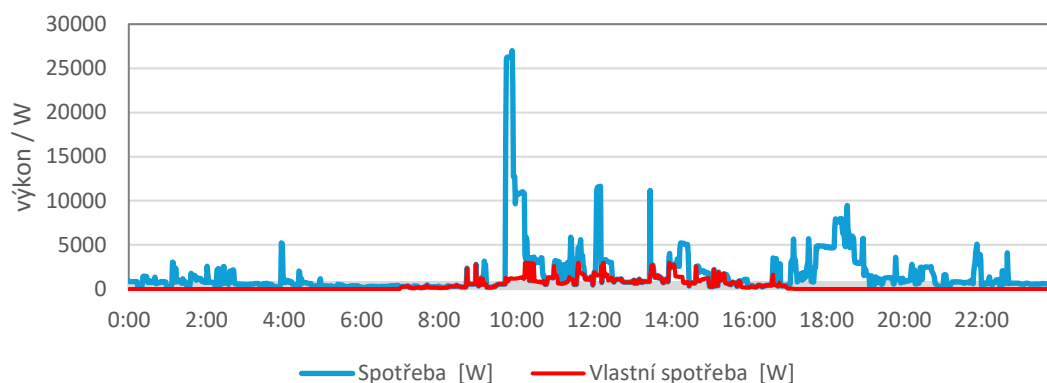
Obr. 1: Roční zátěžový profil domácnost, roční průběh srovnatelný se standardním zátěžovým profilem - hodinové rozlišení.

Tento výchozí jednodominutový profil byl námi přepočítán na profil s rozlišením 5 minut, 15 minut a jedné hodiny. Díky průměrování výkonu klesla špičková zátěž u 5 minutového profilu na 25,8 kW, 15 minutového profilu na 21,2 kW a u hodinového profilu na 6,7 kW. Průběh minutového zátěžového profilu 7. března je možné vidět na obrázku a na obrázku můžete vidět průběh hodinového zátěžového profilu.

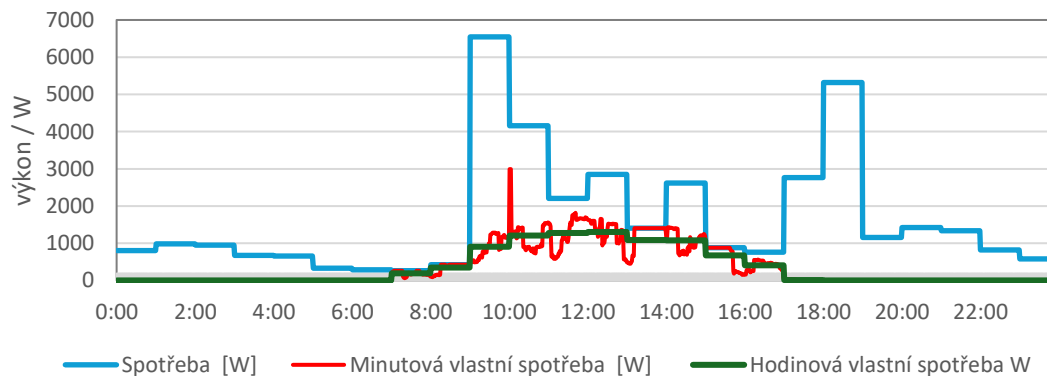
46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 2: Roční zátěžový profil domácnost, roční průběh srovnatelný se standardním zátěžovým profilem - minutové rozlišení.



Obr. 3: Minutový profil domácnosti a vlastní spotřeba 7.3 (polojasno).



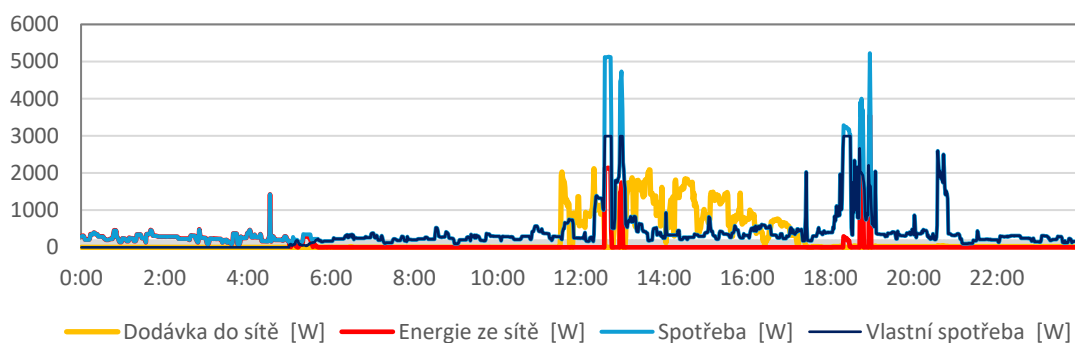
Obr. 4: Hodinový profil domácnost a minutová a hodinová vlastní spotřeba.

Tyto zátěžové profily byly pak použity pro simulaci malého fotovoltaického systému v prostředí PV*SOL s klimatickými daty z oblasti Brno-Město. Simulovaný fotovoltaický systém obsahoval fotovoltaický generátor AIKO A500 fotovoltaické moduly s orientací východ-západ s velikostí 3 kWp. Střídač byl zvolen střídač Huawei SUN2000-3KTL-1 s dvěma MPP vstupy a doplněný o bateriové úložiště LUNA2000 5 kWh. Tento systém byl zvolen tak, aby při zátěžovém profilu s rozlišením 1 minuty a simulačním minutovým krokem dosáhl větší podíl vlastní spotřeby než 75 % a podílů soběstačnosti více jak 45 %. Konkrétně u tohoto systému dostáhl podíl vlastní spotřeby 77,7 % a podíl soběstačnosti 46,7 %. Změna rozlišení zátěžového profilu ovlivňuje jak podíl vlastní spotřeby, tak i podíl soběstačnosti, jak je vidět v tabulce 1.

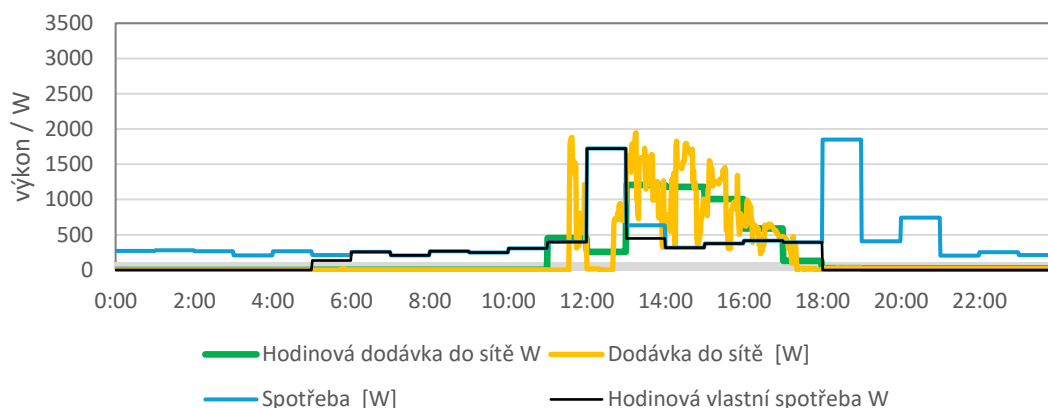
46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tabulka 1: Výsledky simulací.

	Přímá vlastní spotřeba	Podíl vlastní spotřeby	Podíl soběstačnosti
	kWh/rok	%	%
1 minutový profil	2344	77,7	46,7
5 minutový profil	2356	78,0	47,0
15 minutový profil	2372	78,3	47,3
60 minutový profil	2395	78,8	47,7



Obr. 5: Minutový profil domácnosti a vlastní spotřeba 7.8 (polojasno).



Obr. 6: Hodinový profil domácnost a minutová a hodinová vlastní spotřeba

V celoročním pohledu se teda rozdíl v našem systému projeví v jednotkách procent, při pohledu na některé dny se tyto rozdíly mohou lišit vzhledem k počasí i o desítky procent. Například simulace s hodinovými daty pro den 7.3. vychází podíl malému výnosu FVE způsobené nízkou intenzitou osvětlení vlastní spotřeby 21,1 % a při minutovém kroku 21,0 %, tak 7.8. je tato hodnota pohybuje na 80,4 % při minutovém kroku, tak naopak při hodinovém kroku jak simulace spotřeby, tak i hodinové simulace vlastní spotřeby klesne tato hodnota na 51,2 %. Naštěstí PV*SOL umožňuje díky minutovým meteorologickým datům simulovat v kombinaci hodinového rozlišení spotřeby a minutového rozlišení vlastní spotřeby, kdy tato hodnota je 87,5 %, což je opět v toleranci celkové nejistoty simulovaného procesu.

Závěr

Volba rozlišení zátěžového profilu může ovlivnit výsledky simulací provozu fotovoltaického systému jak z hlediska podílu spotřeby vlastní energie, tak z pohledu podílu soběstačnosti. Naštěstí díky velkému počtu statistických vzorků se tento vliv projeví v celoročních simulacích v jednotkách procent. Pokud ale porovnáváme jednotlivé dny, tyto rozdíly pak mohou dosahovat až desítek procent.

Poděkování

Tato práce byla podporovaná grantem Brno University of Technology No. FEKT-S-23-8286 a vznikla za podpory Fakulty vojenských technologií, Univerzity obrany.

VYHODNOCENÍ ELEKTROCHEMICKÉ KINETIKY Z OMEZENÉHO POČTU BODŮ

P. Vanýsek a S. Bátorová

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, Technická 3058/10, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika

Abstract

The evaluation of the kinetic behavior of electrochemical reactions often utilizes slow linear voltammetry, which measures current as a function of applied voltage. The resulting response comprises two exponential components, with zero current occurring at the equilibrium potential. In practice, these curves are analyzed by converting current values to their logarithms which enables linear graphic interpretation. However, near the equilibrium potential, the relationship becomes nonlinear and graphic interpretation is not possible. Thus, in practice slow linear voltammetry data must be collected over a broad potential range, typically ± 120 mV around the equilibrium point. These characteristic plots are known as Tafel curves. In this study we attempt to evaluate slow voltammetric data that have not been collected in the prerequisite wide potential range and see if meaningful interpretation can be still obtained. The core of the evaluation, performed in MS Excel, involved fitting the sum of two exponentials to the data using the least squares method.

Úvod

Při vyhodnocování kinetického chování elektrochemických reakcí se používá metoda pomalé lineární voltamperometrie, kdy se měří závislost proudu na vloženém napětí. Výslednou odezvou je součet dvou exponenciálních závislostí s nulovým proudem při napětí rovném rovnovážnému napětí. V praxi se tyto křivky vyhodnocují elegantně tak, že se proudové hodnoty převedou na jejich logaritmy. V oboru potenciálů, kdy převládá vliv pouze jedné exponenciály, je logaritmus takového průběhu lineární a rovnice této přímky se snadno určí, i třeba graficky. Tato logaritmická závislost však není lineární v oblasti potenciálů poblíž rovnovážného napětí, kde obě exponenciální křivky mají podobnou váhu. Proto je k interpretaci potřeba získat data v širším rozsahu potenciálů, typicky alespoň ± 120 mV od rovnovážného potenciálu. Tyto křivky se v elektrochemii kinetických dějů nazývají dle původního objevitele Tafelovy křivky.

V naší aplikaci nejde o reverzibilní elektrochemický proces, ale o studium koroze, kde oxidace a redukce jsou dva odlišné procesy, nicméně metoda aplikace Tafelových křivek je formálně stále platná. Je tedy třeba měřit proudovou závislost na vloženém potenciálu v dostatečně šíři. Při pravidelném časosběrném získávání dat nicméně došlo v chybě nastavení citlivosti proudového zesilovače, takže všechny proudy nad 10^{-5} A byly nad rozsah, a tedy měly konstantní hodnotu 10^{-5} . To bylo právě v oblasti, kde by se odečítaly lineární části křivek. Vzhledem k tomu, že naměřené výsledky představovaly soubor měření mnoha měsíců, stálo za pokus – přes chybu v měření – pokusit se data zužítkovat.

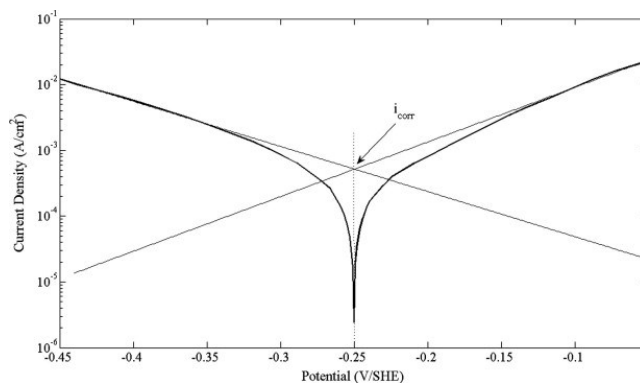
Podstata vyhodnocení v programu MS Excel spočívá v tom, že se použije součtová rovnice obou exponenciál a data se pomocí metody nejmenších čtverců optimalizují na nejmenší odchylku. Jako druhá metoda bylo použito prokládání dat pomocí programu Matlab. Každá z těchto metod má své přednosti a opodstatnění. Při použití programu Excel jsme vycházeli z předpokladu, že je obecně dostupnější a tím i uživatelům více známý.

Obr. 1 ukazuje obecný přístup vyhodnocení polarizačních křivek Tafelovou metodou, kdy se linearizují úseky křivek vzdálených od rovnovážného potenciálu. Rovnice, která křivky popisuje je součet dvou exponenciál obecného tvaru

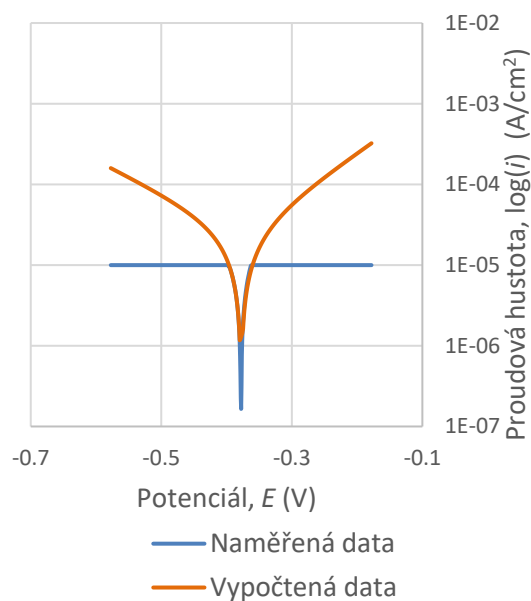
$$i = i_0 \left\{ e^{\left[\frac{\alpha_f n F (E - E_0)}{RT} \right]} - e^{\left[\frac{-\alpha_r n F (E - E_0)}{RT} \right]} \right\} \quad (1)$$

kde i je proudová hustota procházející obvodem, i_0 je korozní proud, F , R a T jsou konstanty, $(E - E_0)$ je rozdíl vloženého a rovnovážného (korozního) potenciálu, α a n jsou nastavitelné parametry, jejichž hodnoty se obecně předpokládají a tak i_0 , korozní proud, je jediný parametr, který je nutné vyhodnocovat. Je to veličina, která dává přímou výpověď o tom, jak daný materiál podléhá elektrochemické korozi.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

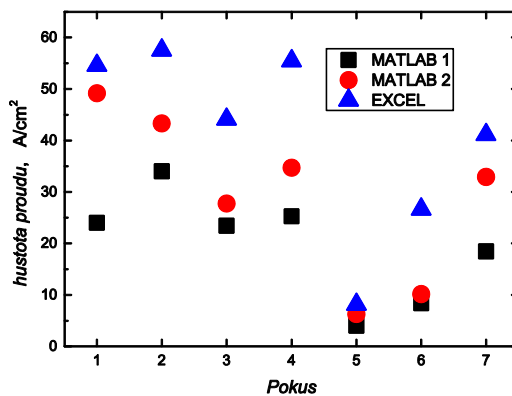


Obr. 1: Příklad použití Tafelovy metody z literatury [1] pro určení korozního potenciálu.



Obr. 2: Porovnání křivek získaných při chybném nastavení přístroje (modrá) a při správném průběhu (červená).

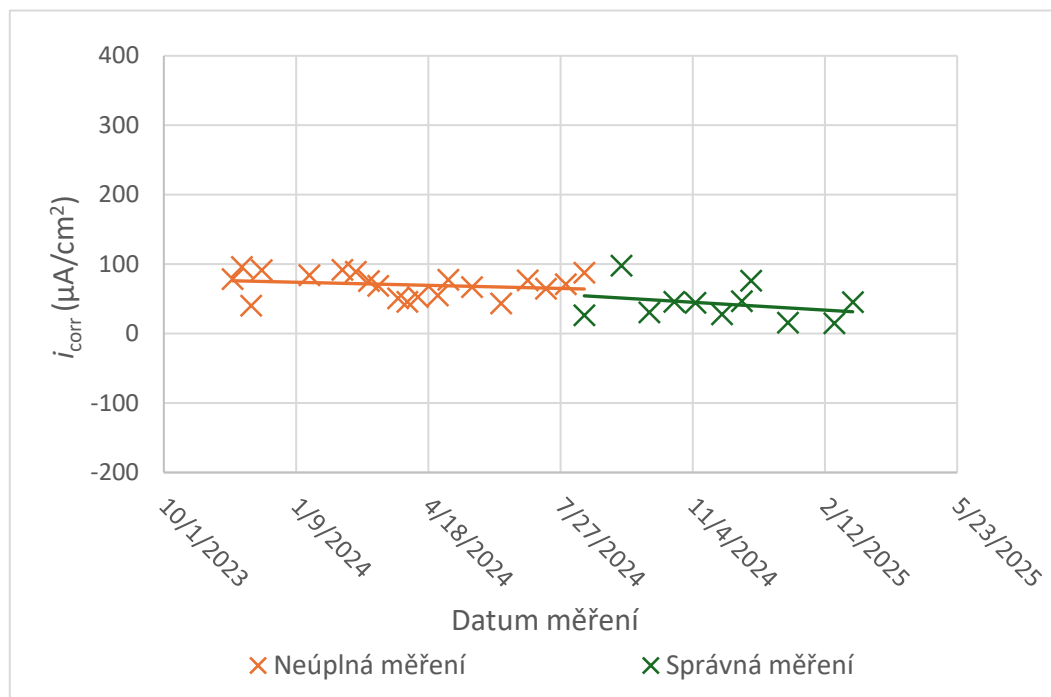
Na Obr. 2, je červená křivka v podstatě podobná křivce z Obr. 1, tedy je ve formě, která se typicky vyhodnocuje. Křivka modrá je však ta, která byly získána při špatném nastavení přístroje. Z toho důvodu prostě není možné interpretovat data ze směrnic lineární části, protože ta neexistuje. Nicméně, hypotéza je, že nelineární části stále obsahují dostatek informace k interpretaci nikoliv linearizací, ale prokládáním dat přímo podle rovnice (1).



Obr. 3: Interpretace korozních proudů při různých experimentech pomocí tří prokládacích metod.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Obr. 3 ukazuje výměnné proudové hustoty interpretované různými metodami prokládání. Z grafu je patrné, že metoda zvolená při použití programu Excel dává téměř vždy poněkud vyšší hodnotu než dva přístupy použité v programu Matlab. Nicméně, z hlediska toho, že bez jedné z těchto interpretací bychom neměli k dispozici vůbec žádná data, lze tento přístup považovat za dostatečně vhodný.



Obr. 4: Porovnání výsledků průběhu korozních proudů s časem v období, kdy byl přístroj již správně nastaven (zelená data), s daty dodatečně získanými z předchozího období pomocí naší metody (červená).

Z Obr. 4 lze vyčíst, že dodatečně získaná data přiměřeně navazují na data v zelené barvě, která byla získána již správným nastavením přístroje. I když mezi oběma sadami je patrná nespojitost, celkový časový trend korozních data za období více než rok je stále užitečný.

Poděkování

Tato práce byla podpořena specifickým vysokoškolským výzkumem VUT v Brně č. FEKT-S-23-8286.

Literatura

- [1] E. Poorqasemi, O. Abootalebi, M. Peikari, F. Haqdar, Investigating accuracy of the Tafel extrapolation method in HCl solutions, Corrosion Science, Volume 51, Issue 5, 2009, Pages 1043-1054, ISSN 0010 938X, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.001>.

PHYSICAL AND REDUCED MODELING OF LIION BATTERY THERMAL ABUSE

P. Vyroubal, T. Kazda a M. Sedlařík

Department of Electrical and Electronic Technology, FEEC BUT Brno, Technická 10, 616 00 Brno

Abstract

Thermal abuse in lithium-ion (Li-ion) batteries poses significant risks to safety and reliability in applications ranging from consumer electronics to electric vehicles. This paper presents a brief overview of the physical mechanisms involved in thermal abuse, explores detailed physical modeling approaches, and introduces reduced-order modeling (ROM) techniques that enable faster simulations with acceptable accuracy. A comparison is drawn through a practical example. Applications of such models in battery pack design and safety diagnostics are discussed.

Úvod

Lithium-iontové baterie (Li-ion) jsou dnes dominantní technologií pro ukládání energie díky své vysoké energetické hustotě a dlouhé životnosti. S tímto rozšířeným využitím však roste i riziko poruch, zejména při extrémních podmínkách, jako je mechanické poškození, přebíjení nebo vystavení vysokým teplotám. Jedním z nejzávažnějších problémů je tzv. tepelný runaway (thermal runaway) – nekontrolovaný nárůst teploty vedoucí k selhání článku až výbuchu či požáru (Mallarapu et al., 2024).

Porozumění a predikce tohoto fenoménu vyžaduje sofistikované modely, které zachycují komplexní chemicko-fyzikální procesy. V literatuře se rozlišují především fyzikální modely vycházející z první principů a zjednodušené modely, které redukují výpočetní náročnost, ale stále poskytují užitečnou predikci (Wei, 2024).

Modelování tohoto jevu má zásadní význam pro vývoj bezpečnějších bateriových systémů.

Fyzikální modely tepelného zneužití

Fyzikální modelování zahrnuje detailní popis chemických reakcí, transportních jevů a přenosu tepla v rámci bateriového článku. Nejčastěji používané modely zahrnují:

- Modely přenosu tepla: Založené na parciálních diferenciálních rovnicích, které popisují vedení, konvekci a sálání tepla.
- Kinetické modely chemických reakcí: Sledují tepelné rozklady SEI vrstvy, elektrolytu a katodových materiálů, jako je LiCoO_2 .
- Modely generování plynu a přetlaku: Zachycují tvorbu plynů (např. CO_2 , H_2) a jejich vliv na mechanickou integritu článku.

Takové modely mají vysokou predikční schopnost, ale jsou náročné na výpočetní výkon, což je problematické při online diagnostice nebo v systémech BMS (Battery Management Systems).

Zjednodušené (reduced-order) modely

Pro použití v reálném čase, např. v systémech BMS, je nezbytné použít zjednodušené modely:

- Lumped thermal models: Modelují celý článek jako jeden tepelný uzel.
- Grey-box modely: Kombinace fyzikálních rovnic a empirických parametrů.
- Machine-learning modely: Trénované na velkém množství experimentálních dat bez nutnosti hlubokého fyzikálního porozumění (Wei, 2024).

Tyto modely jsou méně přesné v extrémních podmínkách, ale dostatečně efektivní pro detekci anomálií nebo včasné varování před přehřátím článku.

Aplikace

Experimentální validace je nedílnou součástí procesu vývoje modelů pro predikci tepelného runaway jevu u lithium-iontových baterií. Žádný model – ať už fyzikální nebo redukovaný – nemůže být považován za spolehlivý, pokud není ověřen na základě reálných měření. Experimenty slouží nejen k validaci výsledků

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

simulací, ale i k získání parametrů nutných pro kalibraci modelu, jako jsou měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost jednotlivých vrstev článku, rychlosti reakcí při různých teplotách a bod iniciace runaway efektu.

Mezi nejčastěji používané experimentální metody patří:

1. Tepelná zátěžová zkouška (Thermal Oven Test)

Při tomto testu je článek umístěn do laboratorní pece a postupně se zahřívá až do bodu, kdy dojde k runaway efektu. Zaznamenávají se veličiny jako teplota, čas do selhání, tlak a produkce plynů. Tento test je často považován za základní metodu, protože poskytuje konzistentní a opakovatelné podmínky. Finegan et al. (2015) využili tuto metodu ve spojení s rentgenovou tomografií ke sledování strukturálních změn v článku během runaway.

2. Test propíchnutí hřebem (Nail Penetration Test)

Jedná se o simulaci mechanického poškození, kdy je bateriový článek propíchnut kovovým hrotem. Tím dochází k lokálnímu zkratu, který může vést k runaway. Sledují se teplotní odezva, rychlost šíření ohniska, tvorba plynů a případná exploze. Wang et al. (2021) použili data z tohoto testu pro ověření přesnosti fyzikálního modelu, přičemž rozdíl mezi simulací a měřením byl menší než 5 %, což svědčí o vysoké přesnosti modelu.

3. Test přebíjení (Overcharge Test)

Zkoumá se chování článku při překročení maximálního nabíjecího napětí. Přebíjení způsobuje nadměrné uvolnění tepla v důsledku vedlejších elektrochemických reakcí. Experimenty sledují, při jakém napětí dochází k nárůstu teploty, změně impedance a následnému runaway. Tyto testy se často používají při testování baterií v automobilovém průmyslu, kde je přebíjení častým scénářem chyby systému.

4. Kalorimetrie (ARC – Accelerating Rate Calorimetry)

Zvláštní typ experimentu, při kterém se článek umístí do kalorimetru a měří se rychlost generace tepla. Tato metoda je zvláště důležitá pro kalibraci kinetických parametrů v modelech. Díky tomu je možné odhadnout tepelné uvolnění v závislosti na teplotě a určit energetický profil jednotlivých reakcí, například dekompozici SEI nebo uvolnění kyslíku z katody.

5. Rentgenová a neutronová tomografie

Slouží k vizualizaci strukturálních změn uvnitř článku během runaway efektu. Tato data jsou extrémně cenná pro vývoj vícevrstvých modelů, které zohledňují odlišné tepelné vlastnosti anody, katody a separátoru.

V kombinaci s numerickým modelováním slouží experimentální data k iterativní kalibraci modelu. Například hodnoty měrného tepla nebo aktivačních energií chemických reakcí mohou být zpřesněny tak, aby model vykazoval co nejvyšší shodu s reálnými měřeními.

Validace se provádí nejen na úrovni jednotlivých článků, ale i pro celé bateriové moduly nebo packy. V těchto případech se simuluje šíření runaway mezi články, vliv tepelných bariér a účinnost chladicích systémů. Experimentální měření zde často zahrnují vícekanálové termokamery, měření rychlosti šíření plamene, nebo akustickou emisní analýzu.

V praxi tato data slouží nejen k vývoji přesných modelů, ale i k návrhu bezpečnostních prvků, jako jsou přetlakové pojistky, tepelné izolace nebo algoritmy pro včasnou detekci selhání v rámci systémů BMS. Díky kombinaci simulačních a experimentálních přístupů je dnes možné předvídat runaway efekt s velkou přesností a významně tak zvýšit bezpečnost lithium-iontových baterií v reálném provozu.

Současné výzvy a budoucí trendy

Ačkoli se modelování runaway efektu za poslední dekádu výrazně posunulo, zůstává řada výzev. Patří sem zejména komplexní chování článků v sadách, které může být ovlivněno interakcemi mezi články, rozdíly v tepelné vodivosti nebo stárnutím jednotlivých komponent.

Rovněž chybí otevřená databáze s experimentálními daty, což komplikuje validaci modelů nezávislými týmy. Výrobci baterií často neposkytují detailní informace o vnitřní konstrukci svých článků, což omezuje možnost přesného nastavení parametrů.

V budoucnu se očekává rozvoj hybridních modelů, které propojí fyzikální popis s metodami strojového učení. Tyto modely umožní vyšší míru přizpůsobení konkrétní baterii, adaptaci na měnící se provozní podmínky a rychlejší výpočty. Dalším trendem je vývoj digitálních dvojčat, tedy virtuálních replik bateriových systémů, které umožní prediktivní údržbu a optimalizaci provozu v reálném čase.

46. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Závěr

Modelování tepelného zneužití Li-ion baterií je klíčové pro jejich bezpečné nasazení. Fyzikální modely nabízejí vysokou přesnost, ale za cenu výpočetní náročnosti. Naopak zjednodušené modely umožňují rychlou simulaci, i když s určitými kompromisy. V praxi se obě skupiny modelů doplňují, zejména při návrhu systémů BMS nebo v rámci víceúrovňového simulačního přístupu.

Poděkování

This work was supported by specific graduate research of the Brno University of Technology No. FEKT-S-23-8286.

Literatura

- [1] KUMARESAN, K., BOOVARAGAVAN, V., WHITE, R.E. Simulation and Analysis of Thermal Runaway in Lithium-Ion Battery Packs. *Journal of Power Sources* [online]. 2006, 154(1), 312–323 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.039>
- [2] SAFARI, M., DELACOURT, C. Modeling of a commercial graphite/LiFePO₄ cell. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2011, 158(5), A562–A571 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1149/1.3557892>
- [3] FINEGAN, D.P., SCHEEL, M., ROBINSON, J.B., aj. Characterizing thermal runaway propagation in lithium-ion cells using X-ray imaging. *Nature Communications* [online]. 2015, 6, 6924 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/ncomms7924>
- [4] WEI, Z. *Smart Battery Management for Enhanced Safety* [online]. Singapore: Springer, 2024 [cit. 2025-05-12]. ISBN 978-981-97-4639-2. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-97-4639-2.pdf>
- [5] MALLARAPU, A., BOOVARAGAVAN, V. Effect of Thermal Runaway Trigger Methods for Battery Safety Characterization. *Electrochemical Society Meeting Abstracts* [online]. 2024 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/MA2024-02162mtgabs/meta>

Generální partneři:



SKODA



Hlavní partneři:



SKUPINA ČEZ

CZE+

CONRAD



Partneři:



Centrum výzkumu a využití
obnovitelných zdrojů
energie

Odborní partneři:



Mediální partneři konference:



Druh:	Neperiodická účelová publikace
Název:	46. Nekonvenční zdroje elektrické energie
Místo konání:	hotel Savannah - Hatě 198
Vydavatel:	Česká elektrotechnická společnost, ÚOS chemické zdroje elektrické energie
Zodpovědný redaktor:	Ing. Ladislav Chladil, Ph.D. doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
ISBN:	978-80-02-03089-8
Stran:	72
Výtisků:	dosupné on-line
Web pro zveřejnění:	http://www.nzee.cz
Formát:	A4
Měsíc a rok vydání:	červen 2025
Vydání:	první

