

LIČIO AKUMULIATORIŲ ENERGETINĖS TALPOS TYRIMAS ESANT SKIRTINGOMS APLINKOS TEMPERATŪROMS

Audrius AKUČKA, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: audrius.akučka@vdu.lt

Kęstutis VENSŁAUSKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: kestutis.venslauskas@vdu.lt

Santrauka

Šiandien atsinaujinančiosios energijos populiarumas nuolat auga, todėl didėjančios energijos sąnaudos skatina energijos kaupimo sistemų tobulinimą ir plėtrą. Baterijų kaupimo technologijos leidžia efektyviai panaudoti perteklinę energiją jos trūkumo metu, todėl vis daugiau vartotojų renkasi kaupti energiją baterijose. Įsirengę elektros energijos saugojimo baterijas, vartotojai gali ne tik kaupti elektros energiją, bet ir parduoti ją rinkoje, kai kainos yra didžiausios. Šio tyrimo tikslas – nustatyti tinkamiausią baterijų tipą darbui skirtingose temperatūrose. Suprojektuotas specialus tyrimų standas, leidžiantis lyginti skirtingų tipų mažos talpos baterijas: ličio jonų (Li-Ion), ličio polimerų (Li-Po) ir ličio geležies fosfato (LiFePO₄). Eksperimento metu baterijų darbinė temperatūra buvo keičiama (+23 °C, +7 °C, –17 °C), o akumuliatoriai buvo iškraunami iki minimalios talpos, taikant pastovią apkrovą nuo 1 A iki 2,5 A, priklausomai nuo baterijų tipo ir celių skaičiaus. Tyrimo rezultatai parodė, kad visų tipų ličio baterijų talpa teigiamoje temperatūroje sumažėjo 3–28 proc. Remiantis eksperimento rezultatais, nustatyta, kad Li-Po baterijos galėjo sukaupti vidutiniškai 9,14 Wh energijos, o esant –17 °C jų talpa sumažėjo 4 proc. LiFePO₄ baterijos vidutiniškai galėjo sukaupti 6,36 Wh energijos, o esant –17 °C jų talpa sumažėjo 66 proc. Li-ion baterijos vidutiniškai galėjo sukaupti 6,33 Wh energijos, o esant –17 °C jų talpa sumažėjo 6 proc. Šie rezultatai leidžia įvertinti baterijų tinkamumą naudojimui skirtingose temperatūrose, siekiant užtikrinti efektyvų energijos kaupimą ir panaudojimą.

Reikšminiai žodžiai: ličio baterijos, elektros energijos kaupimas, akumuliatoriai.

Įvadas

Šiais laikais pasauliniu mastu atsinaujinančioji energija vis labiau populiarėja. Atsinaujinantys energijos šaltiniai 2023 m. Europos Sąjungoje sudarė 24,5 proc. visos elektros energijos (Renewable energy statistics, 2024). Numatoma, kad baterijų kaupikliai iki 2050 m. bus pagrindinė technologija, naudojama atsinaujinančiai energijai integruoti į energijos sistemą. Baterijų naudojimas yra pagrindinė sąlyga pereinant prie švarių energijos šaltinių stabilizuojant elektros tinklą ir diegiant netaisius technologijas (Europos Komisija, 2019).

Pastaraisiais metais išaugo energijos kaupimo sistemų kiekis ir galima numatyti, kad šios sistemos tik populiarės (Clean and renewable European..., 2023). Rinkoje yra skirtingų baterijų pasirinkimas, kurios gali būti naudojamos elektros kaupimui. Visiems puikiai žinomas švino baterijas pakeičia ličio baterijos, kurios būna kelių skirtingų tipų: ličio jonų (Li-Ion), ličio polimerų (Li-Po) ir ličio geležies fosfatų (LiFePO₄). Šios baterijos naudojamos įvairiose energijos kaupimo technologijose, plačiai naudojamos elektros energetikoje, elektrifikuojant visų rūšių transporto priemones, pastatuose, pramonėje, medicinoje, buityje ir kitur, kur naudojami prietaisai ir įranga su autonominiu maitinimu (Adomavičius, 2017). Kai akumuliatoriai veikia žemoje temperatūroje, jo veikimas vis tiek yra nepatenkinamas, o tai labai pablogina jo tinkamumą naudoti šaltuose regionuose (Weixiong Wu et al., 2021). Daugelis tyrimų buvo sutelkti į perkrovimą kambario temperatūroje (Noudeng et al., 2022). Tai rodo, kad trūksta tyrimų dėl įvairių baterijų panaudojimo Lietuvos klimato sąlygomis. Dėl šios priežasties yra pasirinktos skirtingų tipų ličio baterijos, kurios pasižymi ir skirtingomis talpomis, priklausomai nuo darbo temperatūros.

Darbo tikslas – ištirti ličio akumuliatorių energetinę talpą esant skirtingoms aplinkos temperatūroms.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Ištirti temperatūros poveikį skirtingų tipų baterijų efektyvumui.
2. Įvertinti skirtingų baterijų tipų tinkamumą įvairioms naudojimo sąlygoms.
3. Nustatyti elektros srovės įtaką baterijų išskiriamam energijos kiekiui ir jų efektyvumui skirtingose temperatūrose.

Tyrimų objektas ir metodai

Tyrimams buvo suprojektuotas baterijų bandymo standas (žr. 1 pav.). Sistema sudaryta iš išmanaus baterijų įkroviklio „SkyRC D100 Neo“, kuris yra įjungtas į elektros tinklą. Prie įkroviklio yra įjungtas multimetras „UNI-T UT81“, kuris duomenis saugo kompiuteryje. Baterijų temperatūros matavimui naudojamas „INKBIRD TH1 plus“ temperatūros registratorius, kuris duomenis išsaugo atmintyje vienos minutės periodiškumu. Atliekant bandymus prie šios sistemos yra jungiamos skirtingų tipų baterijos. Tyrime yra naudojamos ličio jonų baterijos (Li-ion), ličio polimerų baterijos (Li-Po) ir ličio geležies fosfatų (LiFePO₄). Matuojamų baterijų talpa yra nuo 2100 mAh iki 2600 mAh.



1 pav. Suprojektuoto baterijų bandymo stendo schema

Fig. 1. Designed battery test bench diagram

Parinktos skirtingų tipų ličio baterijos, kurios buvo iškraunamos skirtingomis sąlygomis. Tyrimo metu baterijų talpa buvo matuota skirtingomis temperatūrų sąlygomis: $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kiekvienas ciklas buvo matuojamas pakeitus sąlygas iš kambario temperatūros ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) į tyrimo sąlygas. Baterija buvo pilnai įkrauta kambario temperatūroje ir pakeitus sąlygas baterija iškraunama, jos talpa matuojama iškraunant.

Akumuliatoriaus energetinė talpa apskaičiuojama pagal lygtį:

$$C = \sum(I_{i\text{š}} \cdot \Delta t) / 1000; \quad (1)$$

čia: C – baterijos talpa (mAh), $I_{i\text{š}}$ – elektros srovė kiekviename matavimo taške (A), Δt – laikas (s). Matavimai atlikti kas minutę, todėl $\Delta t = 1\text{ min} = \frac{1}{60}h$.

Akumuliatoriaus sukauptas energijos kiekis apskaičiuotas pagal lygtį:

$$E = \sum(U_{\text{min}} \cdot I_{i\text{š}} \cdot \Delta t); \quad (2)$$

čia: E – baterijos energijos kiekis (Wh), U_{min} – baterijos įtampa kiekviename taške (V), $I_{i\text{š}}$ – elektros srovė kiekviename matavimo taške (A), Δt – laiko intervalas tarp matavimų valandomis (h).

Baterijos energinės talpos efektyvumas apskaičiuotas pagal lygtį:

$$\eta = \frac{E}{C_n \cdot V_{\text{vid1}}} \cdot 100\text{proc.}; \quad (3)$$

čia: η – baterijos energinės talpos efektyvumas (proc.), C_n – nominali baterijos talpa (mAh), V_{vid1} – vidutinė baterijos įtampa (V).

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Tiriant baterijas buvo pastebėta, kad baterijų talpa tiesiogiai priklauso nuo aplinkos temperatūros. Atliekant tyrimą buvo analizuojama, kaip baterijų kaupiklio montavimo vieta gali turėti įtakos baterijų talpai. Atlikti matavimai, kurių metu gauti duomenys buvo lyginami su gamintojo nurodyta nominalia baterijų talpa. Rezultatai parodė, kad reali baterijų talpa skyrėsi nuo gamintojo deklaruojamų reikšmių. Visų baterijų talpa teigiamoje temperatūroje sumažėjo nuo 3 proc.

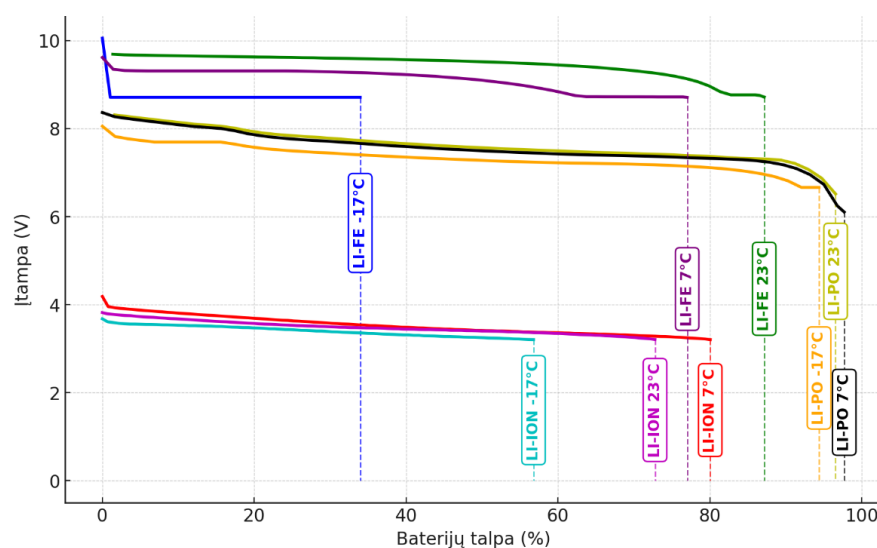
iki 28 proc., priklausomai nuo baterijų tipų. Pakeitus temperatūrą į neigiamą, baterijų talpa sumažėjo nuo 6 proc. iki 66 proc.. Tyrimo rezultatai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Baterijų talpos tyrimo rezultatai skirtingose temperatūrose

Table 1. Battery test results at different temperatures

Baterijos tipas	Tyrimo temperatūra			Baterijos energinės talpos efektyvumas vidutinis naudingumas, priklausomai nuo temperatūros (proc.)
	+23°C	+7°C	–17°C	
Ličio jonų baterijos (Li-ion); mAh	1892	2081	1476	69,85
Ličio polimerų baterijos (Li-Po); mAh	2124	2149	2076	96,18
Ličio geležies fosfatų (LiFePO ₄); mAh	1830	1617	713	66,00

Tyrimo metu nustatyta, kad Li-Po tipo baterijos gana stabiliai išlaiko talpą, nepriklausomai nuo temperatūros (žr. 2 pav.), nes nuo originalios gamyklinės 2200 mAh talpos ties –17 °C sumažėjo tik 124 mAh. Tačiau LiFePO₄ baterija turi palyginti mažą elektroninį laidumą (Jung et al., 2016) todėl esant –17 °C temperatūrai baterijos talpa sumažėjo 1387 mAh nuo 2100mAh gamyklinės talpos.



2 pav. Baterijų talpa iškraunant skirtingose temperatūrose

Fig. 2. Battery capacity when discharging at temperatures

Atliekant bandymus buvo apskaičiuota, kiek procentų baterijos sumažėja kiekviename temperatūros pasikeitime. Labiausiai skirtingas temperatūras gali atlaikyti Li-Po tipo baterija, kurios talpa sumažėjo mažiausiai. Vis dėlto LiFePO₄ baterijos talpa yra labiausiai veikiamą žemos temperatūros, kur pagal gautus duomenis esant –17 °C temperatūrai jos talpa sumažėjo daugiau nei 60 proc.

2 lentelė. Baterijų tyrimo rezultatai skirtingose temperatūrose

Table 2. Battery test results at different temperatures

Baterijų tipas	Temperatūra			Baterijos energijos vidutinis iškvos efektyvumas (proc.)
	+23°C	+7°C	–17°C	
Ličio jonų baterijos (Li-Ion); Wh	6,61	7,32	5,08	67,3
Ličio polimerų baterijos (Li-Po); Wh	9,24	9,26	8,94	56,1
Ličio geležies fosfatų (LiFePO ₄); Wh	9,22	8,18	1,70	30,3

Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta, kad Li-Ion baterijos vidutiniškai išskyrė 7,32 Wh energijos ir jų efektyvumas yra didžiausias ties +7 °C, tačiau energijos kiekis sumažėjo iki 5,08Wh esant –17°C. Ličio polimerų (Li-Po) baterijos išlaikė aukščiausią energijos kiekį 9,14 Wh. Ličio geležies fosfatų (LiFePO₄) baterijos demonstravo nestabiliausią veikimą ir esant –17 °C buvo pastebimas 81,6 proc. mažesnis efektyvumas nei kambario temperatūroje.

Išvados

1. Tyrimo metu buvo ištirtos skirtingų tipų baterijos ir nustatyta, kad temperatūra yra vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių baterijų išsikrovimo eigą. Žemos temperatūros mažina baterijų efektyvumą, spartina įtampos kritimą ir mažina energijos išskyrimą. Ličio jonų (Li-Ion) baterijos pasižymi geriausiais rezultatais įvairiose temperatūrose, jų vidutinis talpos efektyvumas siekia 96,18 proc. Tuo tarpu ličio geležies fosfato (LiFePO₄) baterijos išsiskiria stabilesne iškrovos kreive, tačiau bendras jų naudingumas yra mažesnis – vidutiniškai siekia tik 66 proc., lyginant skirtingas sąlygas.

2. Įvertinus tyrimo rezultatus, siekiant maksimaliai išnaudoti baterijų veikimą, rekomenduojama vengti itin žemų temperatūrų arba taikyti baterijų šildymo technologijas. LiFePO₄ baterijos, veikiamos neigiamos temperatūros, prarado reikšmingą talpos dalį – net 1387 mAh, o tai rodo, kad be papildomo šildymo jos neveikia efektyviai. Tuo tarpu ličio polimerų (Li-Po) baterijos išliko atsparesnės temperatūrų pokyčiams – jų talpa sumažėjo tik 124 mAh, nepriklausomai nuo sąlygų.

3. Eksperimentiniu būdu nustatyta, kad keičiant srovę nuo 1 A iki 2,5 A Ličio polimerų (LiPo) baterijos vidutiniškai išskyrė 9,14 Wh energijos ir pasižymėjo dideliu atsparumu temperatūros pokyčiams – esant –17 °C, jų talpa sumažėjo vos 4 proc. Ličio jonų (Li-Ion) baterijos vidutiniškai išskyrė 6,33 Wh energijos, o esant –17 °C, jų talpa sumažėjo 6 proc., tai rodo santykinai gerą prisitaikymą prie žemos temperatūros. Ličio geležies fosfatų (LiFePO₄) baterijos vidutiniškai išskyrė 6,36 Wh energijos, tačiau esant –17 °C, jų talpa sumažėjo net 66 proc., tai rodo itin stiprų jautrumą žemai temperatūrai. Šie rezultatai patvirtina, kad Li-Po ir Li-Ion baterijos yra atsparesnės šalčiui ir išlaiko aukštesnį efektyvumą, palyginti su LiFePO₄ baterijomis, kurios esant žemai temperatūrai tampa beveik neveiksmingos.

Literatūra

1. Renewable energy statistics. 2024. Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics (žiūrėta 2025-02-03)
2. Strateginės baterijų vertės grandinės kūrimas, pagal Europos komisija. 2019. Prieiga per internetą: <https://secure.ipex.eu/IPEXL-WEB/download/file/082dbcc56a065c98016a06b5a6dd02ce> (žiūrėta 2025-02-06)
3. Santeccchia, A., Castro-Amoedo, R., Nguyen, T. V., Kantor, I., Stadler, P., & Maréchal, F. (2023). The critical role of electricity storage for a clean and renewable European economy. *Energy & Environmental Science*, 16(11), 5350-5370. <https://doi.org/10.1039/D3EE02768F>
4. Adomavičius, V. (2017). Elektros energijos kaupimo principai ir galimybės. Vilnius, Lietuva: Kauno technologijos universitetas
5. Wu, W., Ma, R., Liu, J., Liu, M., Wang, W., & Wang, Q. (2021). Impact of low temperature and charge profile on the aging of lithium-ion battery: Non-invasive and post-mortem analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 170, 121024
6. Noudeng, V., Quan, N. V., & Xuan, T. D. (2022). A future perspective on waste management of lithium-ion batteries for electric vehicles in Lao PDR: current status and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16169.
7. Jung, S., & Jung, H. Y. (2016). Charge/discharge characteristics of Li-ion batteries with two-phase active materials: a comparative study of LiFePO₄ and LiCoO₂ cells. *International Journal of Energy Research*, 40(11), 1541-1555.

INVESTIGATION OF THE ENERGY CAPACITY OF LITHIUM BATTERIES AT DIFFERENT AMBIENT TEMPERATURES

Abstract

Today, the popularity of renewable energy is constantly growing, so rising energy costs are driving the development and expansion of energy storage systems. Battery storage technologies allow for the efficient use of excess energy during times of shortage, which is why more and more consumers are choosing to store energy in batteries. By installing electricity storage batteries, consumers can not only store electricity, but also sell it on the market when prices are highest. The aim of this study is to determine the most suitable type of battery for operation at different temperatures. For this purpose, a special research stand was designed to compare different types of small-capacity batteries: lithium-ion (Li-Ion), lithium polymer (Li-Po) and lithium iron phosphate (LiFePO₄). During the experiment, the operating temperature of the batteries was changed (+23 °C, +7 °C, –17 °C), and the batteries were discharged to their minimum capacity, applying a constant load from 1 A to 2.5 A, depending on the battery type and number of cells. The results of the study showed that the capacity of all types of lithium batteries decreased by 3–28% at positive temperatures. Based on the results of the experiment, it was determined that Li-Po batteries could store an average of 9.14 Wh of energy, and at –17 °C their capacity decreased by 4%. LiFePO₄ batteries could store an average of 6.36 Wh of energy, and at –17 °C their capacity decreased by 66%. Li-ion batteries could store an average of 6.33 Wh of energy, and at –17 °C their capacity decreased by 6%. These results allow us to assess the suitability of batteries for use at different temperatures in order to ensure efficient energy storage and use.

Keywords: lithium batteries, electrical energy storage, accumulator.