

YUQORI SIG'IMLI AKKUMULYATOR BATAREYALARI ISHONCHLILIGINI OSHIRISH USULLARI



Murodov X.Sh.,
Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti, PhD,
dotsent



Bozarova M.B.
Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti,
assistent

Annotatsiya. Mazkur maqolada yuqori sig'imli litiy-ionli akkumulyatorlarning ishonchlili, xavfsizligi va uzoq muddatli ekspluatatsiya barqarorligini ta'minlashga qaratilgan zamonaviy ilmiy-texnik yondashuvlar tizimli va kompleks tarzda tahlil qilinadi. Tadqiqot doirasida akkumulyatorlarning ishlash jarayonida yuzaga keladigan asosiy degradatsiya mexanizmlari, xususan elektrod–elektrolit interfeyslarida sodir bo'ladigan fizik-kimyoviy jarayonlar chuqur o'rganildi. Anod va katod sirtlarida shakllanuvchi himoya qatlamlarining (SEI va CEI) kimyoviy hamda mexanik barqarorligini oshirish orqali interfeys jarayonlarini boshqarish imkoniyatlari tahlil qilindi. Shuningdek, elektrod materiallarining nanostruktur arxitekturasini optimallashtirish orqali ion va elektron transportini yaxshilash, ichki mexanik kuchlanishlarni kamaytirish hamda siklik zaryadlash-tushirish jarayonlarida yuzaga keladigan deformatsiyalarni cheklash mexanizmlariga alohida e'tibor qaratildi. Yuqori kuchlanish va keskin harorat ko'tarilishi sharoitida elektrolitning parchalanish reaksiyalarini bostiruvchi va barqarorlashtiruvchi funksional qo'shimchalarning samaradorligi baholandi. Maqolada issiqlik tarqalishini samarali boshqaruvchi materiallar, faol monitoring va diagnostika tizimlari, shuningdek issiqlik yo'qotilishini kamaytirishga xizmat qiluvchi konstruktiv yechimlarning akkumulyator xavfsizligi va ishlash barqarorligiga ta'siri batafsil yoritildi. Zamonaviy yuqori elektr o'tkazuvchan qatlamlar va ilg'or funksional materiallardan foydalanish orqali ichki qarshilikni kamaytirish, quvvat va energiya zichligini oshirish hamda umumiy energetik samaradorlikni yaxshilash imkoniyatlari ilmiy asoslangan holda ko'rsatib berildi. Integratsiyalashgan ushbu texnologik va materialshunoslik yondashuvlari litiy-ionli akkumulyatorlarning siklik barqarorligini sezilarli darajada oshirish, kimyoviy va issiqlik degradatsiyasi jarayonlarini sekinlashtirish, xavfsizlik mezonlarini mustahkamlash hamda xizmat muddatini uzaytirish imkonini yaratadi. Mazkur tadqiqotda akkumulyatorlarning ishonchlili, ta'sir qiluvchi asosiy omillar tizimli tahlil qilinib, ularning salbiy ta'sirini kamaytirish bo'yicha samarali ilmiy-texnik yechimlar taklif etiladi. Tadqiqotning asosiy maqsadi yuqori sig'imli litiy-ionli akkumulyatorlarning real ekspluatatsiya sharoitida barqaror, xavfsiz va uzoq muddatli ishlashini ta'minlash uchun eng istiqbolli texnologik yondashuvlar va ilmiy yechimlarni aniqlashdan iborat.

Kalit so'zlar: Litiy-ionli batareyalar, interfeys muhandisligi, fizik-kimyoviy jarayonlar, nanostruktura optimizatsiyasi, elektrolit barqarorligi, issiqlik boshqaruvi, elektron o'tkazuvchanlik, energiya zichligi, siklik barqarorlik.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ БОЛЬШОЙ ЕМКОСТИ

Муродов Х.Ш., Бозарова М.Б.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Республика Узбекистан

Аннотация. В данной статье системно и комплексно анализируются современные научно-технические подходы, направленные на обеспечение надежности, безопасности и долговременной эксплуатационной стабильности высокоемкостных литий-ионных аккумуляторов. В рамках исследования подробно изучены основные механизмы деградации, возникающие в процессе работы аккумуляторов, в частности физико-химические процессы, протекающие на интерфейсах электрод–электролит. Проанализированы возможности управления межфазными процессами за счет повышения химической и механической стабильности защитных слоев (SEI и CEI), формирующихся на поверхности анода и катода. Особое внимание уделено оптимизации наноструктурной архитектуры электродных материалов с целью улучшения ионного и электронного транспорта, снижения внутренних механических напряжений и ограничения деформаций, возникающих в ходе циклических процессов заряд-разряд. Оценена эффективность функциональных добавок, подавляющих реакцию разложения электролита и повышающих его стабильность в условиях высоких напряжений и резких температурных колебаний. В статье детально рассмотрено влияние материалов, обеспечивающих эффективное управление тепловыделением, активных систем мониторинга и диагностики, а также конструктивных решений, направленных на снижение тепловых потерь, на безопасность и эксплуатационную стабильность аккумуляторов. Показаны возможности снижения внутреннего сопротивления, повышения мощности и плотности энергии, а также улучшения общей энергетической эффективности за счет применения современных высокоэлектропроводящих слоев и перспективных функциональных материалов. Интеграция указанных технологических и материаловедческих подходов позволяет существенно повысить циклическую стабильность литий-ионных аккумуляторов, замедлить процессы химической и тепловой деградации, усилить критерии безопасности и значительно продлить срок службы батарей. В работе выполнен системный анализ ключевых факторов, влияющих на надежность аккумуляторов, и предложено

ны эффективные научно-технические решения по снижению их негативного воздействия. Основной целью исследования является выявление наиболее перспективных технологических подходов и научных решений, обеспечивающих стабильную, безопасную и долговременную работу высокоемкостных литий-ионных аккумуляторов в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: литий-ионные батареи, интерфейсная инженерия, физико-химические процессы, оптимизация наноструктур, стабильность электролитов, терморегуляция, электронная проводимость, плотность энергии, циклическая стабильность.

WAYS TO INCREASE THE RELIABILITY OF HIGH-CAPACITY BATTERY BATTERIES

Murodov X.Sh., Bozarova M.B.

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. This article presents a systematic and comprehensive analysis of modern scientific and technological approaches aimed at ensuring the reliability, safety, and long-term operational stability of high-capacity lithium-ion batteries. Within the scope of the study, the main degradation mechanisms occurring during battery operation are thoroughly investigated, with particular emphasis on physicochemical processes taking place at the electrode-electrolyte interfaces. The potential for controlling interfacial processes by enhancing the chemical and mechanical stability of protective layers (SEI and CEI) formed on the anode and cathode surfaces is analyzed. Special attention is paid to optimizing the nanostructured architecture of electrode materials in order to improve ion and electron transport, reduce internal mechanical stresses, and limit deformation arising during cyclic charge-discharge processes. The effectiveness of functional additives that suppress electrolyte decomposition reactions and enhance stability under high-voltage conditions and sharp temperature fluctuations is evaluated. The article also examines in detail the impact of materials designed for efficient thermal management, active monitoring and diagnostic systems, as well as structural solutions aimed at minimizing heat losses, on battery safety and operational stability. The potential for reducing internal resistance, increasing power and energy density, and improving overall energy efficiency through the use of advanced highly conductive layers and innovative functional materials is scientifically substantiated. The integration of these technological and materials-science approaches enables a significant improvement in the cyclic stability of lithium-ion batteries, slows down chemical and thermal degradation processes, strengthens safety criteria, and substantially extends battery service life. This study provides a systematic analysis of the key factors affecting battery reliability and proposes effective scientific and technological solutions to mitigate their adverse effects. The main objective of the research is to identify the most promising technological approaches and scientific solutions for achieving stable, safe, and long-term operation of high-capacity lithium-ion batteries under real operating conditions.

Keywords: lithium-ion batteries, interface engineering, physico-chemical processes, nanostructure optimization, electrolyte stability, thermoregulation, electronic conductivity, energy density, cyclic stability.

Bugungi kunda global miqyosda energetika tizimlarining jadallik bilan rivojlanishi, elektr energiya ishlab chiqaruvchi va sanoat korxonalari, elektr transport vositalarining keng joriy etilishi, telekommunikatsiya tarmoqlarining kengayishi yoki avtomatlashtirilishi yuqori sig'imli akkumulyator batareyalariga bo'lgan talabini keskin oshirmoqda. Elektr energiyasini ishonchli saqlash va uni uzluksiz yetkazib berish zamonaviy texnologiyalarning asosiy infratuzilmalaridan biriga aylanib ulgurdi. Ayniqsa, qayta tiklanuvchi energiya manbalari (quyosh, shamol va boshqalar) bilan integratsiyalashgan tizimlarda akkumulyatorlarning roli yanada muhim bo'lib, ular energiya ta'minotidagi tebranishlarni yumshatish va tizimni barqaror ishlashini ta'minlashda hal qiluvchi ahamiyat kasb etmoqda.

Shu bilan birga, yuqori sig'imli akkumulyatorlar ko'plab murakkab fizik-kimyoviy jarayonlarga asoslangan bo'lgani sababli, ularning ishonchligini ta'minlash doimo muhim muammo bo'lib qolmoqda. Haroratning me'yoridan oshishi, elektrodning strukturaviy yemirilishi, elektrolitning kimyoviy beqarorligi, batareya elementlari orasidagi ishlash farqi va ekspluatatsiya rejimlarining noto'g'ri tanlanishi kabi omillar batareyaning xizmat muddatini sezilarli qisqartiradi. Bundan tashqari, yuqori yuklama, yuqori tok zichligida zaryadlanishi, chuqur zaryadsizlanishlar va mexanik ta'sirlar batareyalarning ishlash barqarorligiga salbiy ta'sir etib, favqulodda holatlarga (issiqlik tarqalishi, qisqa tutashuv, quvvatning keskin yo'qolishi) olib kelishi mumkin.

Shu nuqtai nazardan, yuqori sig'imli akkumulyator batareyalarining ishonchligini oshirishga qaratilgan ilmiy izlanishlar dolzarbligi ortib bormoqda. Zamonaviy akkumulyatorlar uchun ishlab chiqilayotgan himoya mexanizmlari, xususan aqlli boshqaruv tizimlari –

akkumulyator boshqaruv tizimi (ABT), issiqlik boshqaruv modullari, optimallashtirilgan zaryadlash algoritmlari va ilg'or materiallar texnologiyasi batareyalarning xavfsizligi va uzoq muddatli ishlashini ta'minlashga xizmat qiladi [1,2,3].

Ketma-ket ulangan ko'p sonli akkumulyatorlarda kuchlanish muvozanatini ta'minlash orqali tizim ishonchligini oshirish masalasi hamda akkumulyator elementlari orasidagi kuchlanish farqlarini kamaytirishga qaratilgan faol va passiv muvozanatlash usullarining ishlash tamoyillari, afzalliklari va amaliy qo'llash imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. [2].

Litiy-ionli batareyalarning issiqlik boshqaruvida issiqlikni samarali tarqatuvchi uglerodli materiallar bilan kuchaytirilgan gibrid faza-o'zgaruvchi materiallardan foydalanish batareyalarning qizishini kamaytiradi va ularning ishonchli hamda xavfsiz ishlashini ta'minlaydi. [1,3].

Shuningdek, boshqa tadqiqotda ya'ni issiqlikni samarali tarqatuvchi uglerodli materiallar yoki h-BN qo'shilgan parafin asosidagi kompozit strukturalarning litiy-ionli batareyalarida issiqlik boshqaruvi imkoniyatlari ya'ni parafin asosida shakllantirilgan gibrid materiallar yordamida issiqlik boshqaruvi imkoniyatlari o'rganildi. Tadqiqot shuni ko'rsatadiki, issiqlikni samarali tarqatuvchi uglerodli materiallar yoki h-BN qo'shilgan parafin asosidagi faza almashuvchi materiallar litiy-ionli batareyalar uchun muhim issiqlik boshqaruvi yechimlarini taqdim etadi. Bu gibrid materiallar faza o'zgarishi orqali issiqlikni yutish bilan birga, ikki o'lchamli yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega materiallar yordamida issiqlikni tez tarqatadi. Natijada, batareyaning xavfsizligi, samaradorligi va xizmat muddati sezilarli darajada oshadi. [2,3,4].

So'nggi o'n yilliklarda yuqori sig'imli akkumulyator batareyalari

zamonaviy texnologik infratuzilmaning ajralmas tarkibiy qismiga aylanadi. Raqamli texnologiyalarning jadal rivojlanishi, elektrotransport vositalarining keng miqyosda joriy etilishi, qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish hajmining ortishi hamda ko'chma elektron qurilmalar bozorining barqaror kengayib borishi energiya saqlash tizimlariga bo'lgan talabning sezilarli darajada oshishiga olib kelmoqda. Ayniqsa, yuqori quvvat va yuqori energiya zichligini o'zida mujassamlashtirgan litiy-ionli, litiy-polimerli, nikel–marganes–kobalt oksidli, litiy–temir–fosfatli hamda yangi avlod litiy–oltingugurtli turidagi batareyalar global energetik tizimlarning asosiy tayanch texnologiyalariga aylanib bormoqda [5,6].

Ushbu texnologiyalarning jadal rivojlanishi bilan bir qatorda ularning ishonchiligi, uzoq muddatli barqarorligi, xavfsizligi, ko'p martalik siklga chidamliligi va ekspluatatsiya vaqtida degradatsiya darajasi bo'yicha talablari ham keskin kuchaymoqda. Masalan, elektrotransport vositalarida akkumulyator faqat energiya manbai sifatida emas, balki xavfsizlik tizimining ham asosiy komponenti hisoblanadi. Batareyaning kichik nosozligi nafaqat energiya samaradorligini pasaytiradi, balki issiqlik boshqaruvidan chiqishi, yong'in xavfi va mexanik shikastlanishi kabi jiddiy oqibatlarga ham olib kelishi mumkin. Shuning uchun ham yuqori sig'imli akkumulyatorlarning ishonchiligi oshirish masalasi hozirgi kunda ilmiy-tadqiqot institutlari, avtomobil sanoati, energetika korxonalari va elektronika ishlab chiqaruvchilar uchun muhim strategik vazifa bo'lib qolmoqda [6,7,8].

Akkumulyator ishonchiligi ko'p omillardan iborat bo'lib, ularni uch asosiy guruhga ajratish mumkin:

1. Elektr kimyoviy barqarorlik – anod va katod materiallarining degradatsiyasi, **qattiq elektrolit oraliq** qatlamining o'sishi, litiy dendritlarining shakllanishi, elektrolitning kimyoviy eskirishi.

2. Issiqlik jarayonlarining boshqarilishi – element ichidagi issiqlik ajralishi, modullar bo'yicha issiqlikning notekis taqsimlanishi, sovitish tizimining samaradorligi.

3. Boshqaruv tizimlari ishonchiligi – ABT ning aniqligi, elementlararo muvozanatlash mexanizmi, zaryad-zaryadsizlash algoritmlarining to'g'ri tanlanishi va xavfsizlik bayonnomalarining ishlashi.

Zamonaviy yuqori sig'imli akkumulyatorlarning ishonchilik darajasini matematik tahlil qilish quyidagi ishonchilik funksiyasi ko'rinishda tasvirlanadi:

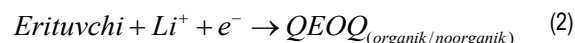
$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

bu yerda λ — umumiy nosozliklar intensivligi bo'lib, u elektrokimyoviy, issiqlik va mexanik jarayonlarning kompleks ta'siridan hosil bo'ladi. Yuqori quvvatli batareyalarda bu o'zgaruvchilar o'zaro murakkab chiziqliq munosabatda bo'lib, ularni to'g'ri boshqarish ishonchilikka bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Shu bilan birga, energiya zichligini oshirish tendensiyasi batareyalar ichida kimyoviy reaksiyalarning kuchayishiga olib kelmoqda, bu esa xavfsizlik bo'yicha yangi muammolarni yuzaga keltiradi. Natijada zamonaviy ilmiy izlanishlar, ayniqsa litiy–oltingugurtli va qattiq holatli batareyalar bo'yicha ishlanmalar, aynan ishonchilikni oshirishga qaratilgan.

Yuqori energiya sig'imiga ega Litiy-ionli elementlarda degradatsiya jarayonlarining eng muhim manbalaridan biri — bu anod yuzasida shakllanadigan "qattiq elektrolit oraliq qatlami" (QEOQ) ning bosqichma-bosqich qalinlashishidir. QEOQ qatlami dastlab stabilizator sifatida zarur bo'lsa-da, uning tartibsiz rivojlanishi batareyaning ichki qarshiligini oshirib, sikllar davomida sig'im yo'qotilishiga olib keladi [9,10].

Litiy-ionli batareyasi anodida (odatda grafit) elektrolitning past potensialda qaytarilishi natijasida noorganik va organik birikmalardan iborat plyonka paydo bo'ladi:



Bu qatlam elektronlarni o'tkazmaydi, lekin Li^+ ionlarining o'tishiga imkon yaratadi.

QEOQ asosiy tarkibi — Li_2CO_3 , LiF , ROCO_2Li tipidagi uglevodorod zanjirli organik litiy karbonatlar, $(\text{CH}_2\text{OCO}_2\text{Li})_2$ polimer karbonatlar.

QEOQ vaqt o'tishi bilan qayta-qayta tiklanadi. Bu tiklanish anod yuzasida yana Li^+ sarf bo'lishiga olib keladi.

$$Q_{\text{yo'qotish}} \propto \int i_{\text{QEOQ}}(t) dt \quad (3)$$

bu yerda, $Q_{\text{yo'qotish}}$ — sig'im yo'qotilishi, i_{QEOQ} — QEOQ o'sishiga ketgan sig'im toki.

QEOQ qalinlashgan sayin, Li^+ ionlarining diffuziyasi qiyinlashadi:

$$D_{\text{samarra}} = \frac{D_0}{1 + \alpha d_{\text{QEOQ}}} \quad (4)$$

bu yerda: D_{samarra} — Li^+ ionlarining QEOQ qatlami orqali effektiv diffuziya koeffitsienti, D_0 — QEOQ yo'q bo'lgan holatdagi boshlang'ich diffuziya koeffitsienti, d_{QEOQ} — QEOQ qatlami qalinligi, α — QEOQ materialining struktura va zichligiga bog'liq empirik koeffitsient.

QEOQ qatlami litiy-ionli batareyasi uchun zarur himoya qatlamidir, ammo uning cheksiz qalinlashuvi — degradatsiyaning eng asosiy manbai hisoblanadi. Qalinlashuv natijasida: Li^+ yo'qoladi, ichki qarshilik oshadi, energiya sig'imi kamayadi, elektrod sirtida zo'rqiqlik kuchayadi, batareya uzoq muddat ishlash ishonchiligi yo'qotadi.

Yuqori sig'imli anodni ishlatish QEOQ muammosini yanada kuchaytiradi va batareya tuzilishda interfeysni boshqarish eng kritik masalaga aylanadi.

Barqaror, elastik, yuqori ion o'tkazuvchan, past elektron o'tkazuvchan qatlam yaratish orqali QEOQ o'sishi cheklanadi. Buning yechimlari: keramika nanoplyonkalar (Li_3N , LiPON), polimer-elektrolit qoplamalar, karbon asosli nanoqatlamlar (amorfi C, grafen) hisoblanadi.

Kremniy yuqori nazariy sig'imga ega, biroq litiylanish paytida 300% gacha hajm kengayadi. Quyida mexanik zo'rqiqlik modeli ya'ni, katta zo'rqiqlik $\rightarrow$ QEOQ yorilishi $\rightarrow$ qayta hosil bo'lish sikli $\rightarrow$ litiyning yo'qolishi:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = e \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5)$$

bu yerda:

σ — Mexanik zo'rqiqlik (N/m^2 yoki Pa) — bu anod materialidagi kuchlanish darajasini bildiradi, yuqori zo'rqiqlik QEOQ ning yorilishiga olib keladi.

E — elastiklik moduli (N/m^2) — materialning qattiqligi yoki elastik chidamliligini ko'rsatadi, katta $E \rightarrow$ material kam egiladi, kichik $e \rightarrow$ material yumshoqroq, ko'proq deformatsiyalanadi.

ε — nisbiy deformatsiya (o'lchovsiz) — anod hajmi o'zgarishini o'lchaydi ya'ni:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

bu yerda:

ΔL — anod uzunligidagi o'zgarish (m yoki μm) — litiyning anodga kirishi yoki chiqishi bilan yuzaga keladigan hajm kengayishi.

L_0 — boshlang'ich uzunlik (m yoki μm) — Anod materialining boshlang'ich uzunligi yoki asosiy o'lchami.

Si-anod zo'rqiqlikni kamaytirish uchun quyidagicha yechimlardan foydalanishimiz mumkin, bo'shliqli — hajm kengayishini qisman o'z ichiga oladi, zo'rqiqlikni kamaytiradi, Si/C kompozitlar — yumshoq karbon matritsa zo'rqiqlikni "yutadi" va yorilishni oldini oladi, amorfi kremniy qoplamalari — elastikligi tufayli deformatsiyani yaxshiroq qabul

qiladi, sferik granulalar – sirt zo'riqlashini kamaytiradi, QEOQ yorilishini pasaytiradi [7,11].

Elektrolit barqarorligini oshirish – elektrolit Litiy-ionli batareyalarda ion harakati uchun asosiy vosita bo'lib, uning kimyoviy barqarorligi QEOQ qatlamining hosil bo'lishi va batareyaning uzoq muddatli ishlashi bilan chambarchas bog'liq. Elektrolitning degradatsiyasi QEOQ qalinlashishini tezlashtiradi, natijada esa, ion transporti sekinlashadi (D_{samarara} – kamayadi), ichki qarshilik oshadi, batareya sig'imi va xizmat muddati qisqaradi.

Reaksiya tezligining haroratga bog'liqligi Arxemis qonuniga asosan, hamda – elektrolit parchalanish tezligi ko'pincha Arxemis tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$k(T) = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

bu yerda, $k(T)$ — reaksiyaning tezligi harorat T da (s^{-1} yoki boshqa bir o'lchov); k_0 — pre-eksponensial koeffitsient, material va elektrolitning boshlang'ich reaktivligi bilan bog'liq; E_a — aktivatsion energiya (J/mol), ya'ni molekular reaksiyaga kirish uchun zarur bo'lgan minimal energiya; R — universal gaz doimiysi (8.314 J/mol·K); T — absolyut harorat (Kelvin).

Harorat oshishi bilan eksponensial qism kamayadi ($-E_a/RT$ kichrayadi), shuning uchun $k(T)$ keskin oshadi, yuqori haroratda elektrolit tez parchalanadi, QEOQ qatlami tezroq o'sadi va batareya tez eskiradi. Shu sababli batareyalarni issiqlik boshqarish va past harorat rejimlarida ishlatish muhim.

Barqaror elektrolitlar QEOQ barqarorligini oshiradi va degradatsiyani sekinlashtiradi. Zamonaviy yondashuvlarga asoslangan holda, Sulfonatli yangi solventlar – elektrolit oksidlanishga chidamli bo'ladi, yuqori potentsialda QEOQ hosil bo'lishini pasaytiradi. Yuqori oksidlanish potentsialiga ega qo'shimchalar – katod yuzasida ortiqcha oksidlanishni oldini oladi, QEOQ bilan reaksiyani kamaytiradi. Ftorlangan qo'shimchalar (FTS, LiPF₆ stabilizatorlari) – QEOQ qatlamida barqaror litiy florid hosil qiladi, u yuqori ion o'tkazuvchan va elektr o'tkazmaydigan qatlam sifatida xizmat qiladi. Natijada barqaror elektrolitlar QEOQ qalinlashuvini nazorat qiladi, litiyning yo'qolishini kamaytiradi va batareyaning uzoq muddat ishlashini ta'minlaydi [7].

Issiqlik boshqaruv tizimi – yuqori sig'imli litiy-ionli batareyalar ishlash davomida lokal issiqlik markazi hosil qiladi. Bu issiqlik konsentratitsiyalari anod va katod yuzasida QEOQ ning tez degradatsiyasiga, elektrolit parchalanishiga va ion harakati sekinlashishiga olib keladi. Shuning uchun samarali issiqlik boshqaruv tizimi batareyaning xavfsizligi va uzoq muddat ishlashini ta'minlash uchun juda muhim.

Faza o'zgaruvchi materiallar (FO'M) yondashuvi – energiyani o'zgaruvchi holatlarda saqlaydigan materiallar bo'lib, qattiqdan suyuqqa yoki suyuqdan qattiqqa o'tishda issiqlik yutilishini maksimal darajada oshiradi.

$$Q = m \cdot L \quad (8)$$

bu yerda, Q — FO'M tomonidan yutilgan issiqlik (J); m — FO'M massasi (kg); L — eritilish yoki qotish issiqligi (J/kg)

Batareya ishlaganda hosil bo'lgan issiqlik FO'M ichiga singadi, lokal haroratning keskin o'sishini kamaytiradi. Bu QEOQ qatlamining tez degradatsiyasini sekinlashtiradi va elektrolitning oksidlanish tezligini pasaytiradi.

Issiqlikni samarali tarqatuvchi uglerodli materiallar va h-BN asosidagi issiqlik tarqatuvchilar – batareya ichidagi issiqlik tarqalishini oshirish uchun yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega materiallar ishlatiladi: grafen — 2000–5000 W/m·K; Geksagonal Bor Nitriti (h-BN) — 300–600 W/m·K.

Issiqlik oqimi Fur'e qonuni bilan ifodalanadi:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

bu yerda, q — issiqlik oqimi (W/m²); k — materialning issiqlik o'tkazuvchanligi (W/m·K); dT/dx — harorat gradienti

Yuqori k qiymati issiqlikni tez tarqatadi va lokal issiqlik markazlarini kamaytiradi. Issiqlikni samarali tarqatuvchi uglerodli materiallar ultrayuqori issiqlik o'tkazuvchanligi tufayli nano- FO'M yoki anod/katod yuzalarida samarali issiqlik tarqatuvchi qatlam sifatida ishlatiladi. h-BN esa elektr o'tkazmaydigan, ammo issiqlikni barqaror tarqatadigan material sifatida xizmat qiladi. Shu kombinatsiya bilan batareya ichidagi harorat taqsimoti tekislanadi, QEOQ degradatsiyasi pasayadi va batareya xizmat muddati oshadi.

Zaryadlash bayonnomalarini optimallashtirish – yuqori sig'imli litiy-ionli batareyalarda zaryadlash jarayoni batareya umriga, xavfsizligiga va ishlash samaradorligiga bevosita ta'sir qiladi. Zaryadlash bayonnomalarini optimallashtirishning asosiy maqsadi esa, batareya xizmat muddatini uzaytirish, harorat va zo'riqlashlarni kamaytirish, energiya samaradorligini maksimal darajada oshirishdan iborat [5,6].

Bu jarayonni matematik jihatdan quyidagi yondashuvlar bilan ifodalash mumkin. Zaryadlashning asosiy tenglamasi – batareya zaryadlanishi tok bilan boshqariladigan jarayon bo'lib, umumiy formulasi:

$$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (10)$$

bu yerda, $I(t)$ – batareyaga berilayotgan zaryadlanish toki (A), C – batareya sig'imi (Ah), $V(t)$ – batareya kuchlanishi vaqt davomida o'zgarishi (V). Bu tenglama tok va kuchlanish o'rtasidagi dinamikani ifodalaydi.

Doimiy tok (DT)– doimiy kuchlanish (DK) bayonnomasi

Ko'p ishlatiladigan zaryadlash protokoli – DT-DK:

– Doimiy tok (DT)– boshlang'ich bosqichda batareyaga doimiy tok beriladi.

– Doimiy kuchlanish (DK) – batareya kuchlanishi maksimal qiymatga yetganda, tok asta-sekin kamayadi va kuchlanish barqarorlanadi.

DT bosqichi uchun energiya o'tishi:

$$Q_{DT} = \int_0^{t_{DT}} I_{DT} dt = I_{DT} \cdot t_{DT} \quad (11)$$

DK bosqichi uchun:

$$Q_{DK} = \int_{t_{DT}}^{t_{umumiy}} I(t) dt \quad (12)$$

Shunday qilib, umumiy zaryad:

$$Q_{umumiy} = Q_{DT} + Q_{DK} \quad (13)$$

Tokni optimallashtirish formulalari – batareya zo'riqlashini kamaytirish uchun tok chegarasi harorat va kuchlanishga bog'lanadi:

$$I_{opt}(T, V) = I_{max} \cdot \left(1 - \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}\right) \cdot \left(1 - \frac{V - V_{nom}}{V_{max} - V_{nom}}\right) \quad (14)$$

u yerda, I_{opt} – optimal tok, T – batareya harorati (K), V – batareya kuchlanishi (V), I_{max} – maksimal ruxsat etilgan tok. Bu formulada harorat va kuchlanish oshgan sari tok avtomatik kamayadi, bu issiqlik zo'riqlashi va elektrolit degradatsiyasini oldini oladi.

Batareya xizmat muddatini uzaytirish – batareya sikllari davomida zaryadsizlanish chuqurligi ko'rsatkichlari (ZCHK) va zaryadlanish darajasi (ZD) parametrlarini optimallashtirish muhim:

$$L_{sikl} \propto \frac{1}{ZCHK^\alpha} \quad (15)$$

bu yerda, L_{sikl} – batareya tsikllari soni, ZCK – zaryadsizlanish chuqurligi ko'rsatkichlari (%), α – materialga bog'liq parametr (odatda 1–2 oraliq'ida). Shunday qilib, to'liq zaryadlash va chuqur bo'shatish batareya umrini qisqartiradi, optimal diapazon – 20–80% ZD.

Katod materiallarining barqarorligi – yuqori sig'imli litiy-ionli batareyalarda katod batareyaning eng muhim komponentlaridan biridir, chunki uning kimyoviy va struktural barqarorligi batareya hayotini, energiya zichligini, termal xavfsizligini to'g'ridan-to'g'ri belgilaydi. Katod materiali zaryadlash va bo'shatish tsikllari davomida litiy ionlarini qabul qilish va chiqarish jarayonida mexanik va kimyoviy zo'riqishlarga duch keladi. Shu jarayonda barqarorlikni oshirish muhim [7,8,9].

Katod materialining barqarorligi quyidagi parametrlar orqali ifodalanadi:

$$S_{katod} = f(E_{tuzilishi}, E_{xim}, T, x_{Li}) \quad (16)$$

bu yerda, S_{katod} – katod barqarorligi, $E_{tuzilishi}$ – kristall tuzilish energiyasi, E_{xim} – kimyoviy energiya (reaktsiyaga chidamlilik), T – harorat (K), x_{Li} – litiyli konsentratsiyasi katodda.

Kristall va kimyoviy barqarorlik bir-biriga bog'liq: struktura barqaror bo'lmasa, kimyoviy degradatsiya tezlashadi.

Litiyni ajratib olish va barqarorlik – katoddagi litiyni chiqarish jarayoni katod barqarorligini kamaytiradi. Bu jarayon entalpiya bilan ifodalanadi:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (17)$$

bu yerda, ΔG – Gibbs erkin energiyasi (katod barqarorligini ko'rsatadi), ΔH – entalpiya o'zgarishi (J/mol), ΔS – entropiya o'zgarishi (J/mol·K), T – harorat (K)

Agar $\Delta G > 0$, katod metastabil yoki degradatsiyaga moyil bo'ladi; $\Delta G < 0$ bo'lsa, katod barqaror.

Siklik barqarorlik va degradatsiya – batareya tsikllari davomida katodning sig'imning kamayishi quyidagi formulalar bilan baholanadi:

$$C_{qoldiq}(n) = C_0 \cdot e^{-k_{deg} \cdot n} \quad (18)$$

bu yerda, $C_{qoldiq}(n)$ (n)-chi sikldan keyingi qolgan quvvat, C_0 – dastlabki quvvat, k_{deg} – degradatsiya konstantasi (sikl⁻¹), n – zaryadlanish-zaryadsizlanish sikli. k_{deg} – qiymati materialning kimyoviy va strukturaviy barqarorligiga bog'liq: yuqori barqaror katodlar uchun k_{deg} – kichik bo'ladi [10,11].

Xulosa. Sohadagi tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, akkumulyatorning umumiy xizmat muddati va xavfsizlik darajasi ko'pchilik hollarda materiallar tanlovi, issiqlik boshqaruv texnologiyasi, tok zichligini tartibga solish, zaryadlash algoritmi, sezgichlar aniqligi, mexanik konstruksiyaning barqarorligi kabi omillarga bog'liq. Shu sababli ishonchlikni

oshirish bo'yicha yagona usul mavjud emas — aksincha, kompleks yondashuv talab etiladi.

Tadqiqotlar natijasida aniqlanishicha, litiy-ionli batareyalarda ishonchlikni cheklovchi asosiy omillardan biri anod yuzasida hosil bo'ladigan QEOQ ning nazoratsiz qalinlashuvidir. QEOQ dastlab elektrodni himoyalovchi barqaror qatlam vazifasini bajarsa-da, uning ortiqcha o'sishi Li^+ ionlarining diffuziyasini cheklaydi, ichki qarshilikni oshiradi va sig'imning qaytarib bo'lmas yo'qotilishiga sabab bo'ladi. Ayniqsa, yuqori sig'imli kremniy asosli anodlarda hajmiy kengayish natijasida yuzaga keladigan mexanik zo'riqishlar QEOQ ning yorilishi va qayta hosil bo'lish sikllarini tezlashtiradi.

Elektrolitning kimyoviy barqarorligi QEOQ evolyutsiyasi va batareya xizmat muddatini belgilovchi muhim omil ekani ko'rsatildi. Haroratning oshishi Arxemis qonuniga muvofiq elektrolit parchalanish tezligini keskin kuchaytirib, degradatsiya jarayonlarini jadallashtiradi. Shu bois, fforlangan qo'shimchalar asosida QEOQ qatlamida barqaror litiy floridni hosil qiluvchi elektrolitlar qo'llanilishi ion o'tkazuvchanligi yuqori va elektron o'tkazmaydigan himoya qatlamini shakllantirib, batareya barqarorligini sezilarli darajada oshiradi.

Issiqlik boshqaruvi tizimlarining ahamiyati alohida ta'kidlanadi. Faza o'zgaruvchi materiallar hamda yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega uglerodli materiallar va h-BN kombinatsiyasidan foydalanish batareya ichidagi lokal issiqlik markazlarini kamaytirib, harorat taqsimotini tekislaydi. Bu esa QEOQ degradatsiyasini sekinlashtiradi, elektrolitning oksidlanishini kamaytiradi va batareya xavfsizligini oshiradi.

Shuningdek, zaryadlash bayonnomalarini optimallashtirish, xususan doimiy tok-doimiy kuchlanish rejimlarining moslashuvchan boshqarilishi, tokning harorat va kuchlanishga bog'liq cheklanishi hamda zaryadsizlanish chuqurligining optimal diapazonda saqlanishi batareya sikl davomiyatini sezilarli oshirishi isbotlandi. ABT ning aniqligi va elementlararo muvozanatlash mexanizmlari umumiy tizim ishonchligini belgilovchi hal qiluvchi omil sifatida namoyon bo'ladi.

Umuman olganda, yuqori sig'imli litiy-ionli akkumulyator batareyalarining ishonchligini oshirish kompleks yondashuvni talab etadi. Bu yondashuv elektrokimyoviy interfeysni boshqarish, barqaror elektrolit va elektrod materiallarini tanlash, samarali issiqlik boshqaruvi, shuningdek, aqlli zaryadlash va boshqaruv algoritmlarini integratsiyalashni o'z ichiga oladi. Mazkur yo'nalishlarda olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlar kelajakda xavfsiz, uzoq xizmat muddati va yuqori samaradorlikka ega energiya saqlash tizimlarini yaratish uchun mustahkam ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Bibliografik ro'yxat

1. Ataullaev N.O., Dziaruhina E.A., Murodov Kh.Sh. Static Characteristics of Magnetic Modulation DC Converters with Analog Filter. // Международный научно-технический журнал. № 5. – Белорусия. «Наука и техника». 2023. – с. 428-433.
2. Murodov X.Sh. Ketma-ket ulangan ko'p sonli akkumulyatorlarda kuchlanishni muvozanatlash orqali ishonchligini oshirish // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences DOI: 10.24412/2181-144X-2024-4-58-63 Vol.4(5), 2024 58-63 bet.
3. Pradyumna Goli va boshqalar Graphene-Enhanced Hybrid Phase Change Materials for Thermal Management of Litiy-ionli Batteries// <https://arxiv.org/abs/1305.4140>
4. Bohayra Mortazavi, Hongliu Yang, Farzad Mohebbi, Gianaurelio Cuniberti, Timon Rabczuk Graphene or h-BN paraffin composite structures for the thermal management of Litiy-ionli batteries: A multiscale investigation //20.06.2017//<https://arxiv.org/abs/1706.06667>
5. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях. // Ползуновский вестник. –М.: – 2013. № 4-2. – 176-181 с.
6. Рыкованов А.С. Активные и пассивные системы баланса Litiy-ionli аккумуляторных батарей. // Компоненты и технологии. – М.: № 3. – 2014. –121 –124 с.
7. Иншаков А.П. Проблема мониторинга и балансировки аккумуляторных батарей транспортных средств. // Вестник мордовского университета. – Саранск. № 1. – 2016. – 40-49 с.
8. Бухаров А. И. А. Емельянов, В. П. Суднов Средства заряда аккумуляторов и аккумуляторных батарей: Справочник—М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
9. Ufert M., Baker B. Battery Ageing as Part of the System Design of Battery Electric Urban Bus Fleets. // Белорусский национальный технический университет. – Белорусия. «Наука и техника». № 19(1). 2020. – с. 12-19. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-1-12-19>
10. Murodov X.SH., Qarshibayev A.I., Boboqulov J.S. Elektr energiyasini yig'uvchi elektr kimyoviy moslamalarni qutblash tashkil etuvchisi qiymatini hisoblash dasturi. – T.: «O'zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi guvohnomasi», DGU 30084. 2023. – 1 b.
11. Ataulloyev N, Ataulloyev A and Karimtoшович S M 2021 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (UK) Journal of Physics: Conference Series, Volume 2094, Instrumentation Technology and Environmental Engineering Citation N O Ataulloyev et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2094 052039 DOI 10.1088/1742-6596/2094/5/052039