YUQORI SIG‘IMLI KO‘P SONLI AKKUMULYATORLARNING DEGRATATSIYA HOLATINI BAHOLASH ME'ZONINI ISHLAB CHIQISH

Xasan Murodov
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti
Maftuna Bozarova
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti

Annotatsiya. Ushbu maqolada yuqori sig‘imli va ko‘p elementli akkumulyator tizimlarida yuzaga keladigan kimyoviy, mexanik hamda elektrokimyoviy degradatsiya jarayonlari chuqur tahlil qilinadi. Tadqiqot doirasida qo‘rg‘oshin–kislotali, nikel-kadmiy (Ni-Cd), nikel-metall gidrid (Ni-MH) va litiy-ion (Li-ion) akkumulyatorlarining ishlash muddatiga ta’sir etuvchi asosiy omillar – aktiv moddaning yemirilishi, elektrodlarning struktura o‘zgarishi, zaryadlanish jarayonlaridagi nomutanosiblik va haroratga sezgirlik – batafsil o‘rganildi. Har bir texnologiya uchun sig‘imning kamayishi, ichki qarshilikning ortishi, issiqlik tarqalishidagi farqlar va samaradorlikning pasayishi kabi ko‘rsatkichlarga asoslangan universal degradatsiya holatini baholash mezoni ishlab chiqildi. Shuningdek, tizim darajasida akkumulyatorlarning texnik holatini tezkor baholash imkonini beruvchi kompleks diagnostika indeksi taklif etildi. Keltirilgan yondashuv energiya saqlash tizimlari, elektrotransport vositalari va katta quvvatli zaxira quvvat manbalarida ishonchlilikni oshirish, ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish hamda xizmat muddatini uzaytirish uchun amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: akkumulyator degradatsiyasi, qo‘rg‘oshin–kislotali batareya, diagnostika, sig‘im yo‘qolishi, ichki qarshilik, baholash, harorat, zaryadlash-zaryadsizlash.

Аннотация. В данной статье представлен углубленный анализ процессов химической, механической и электрохимической деградации, происходящих в высокоемкостных и многоэлементных аккумуляторных системах. Подробно изучены основные факторы, влияющие на срок службы свинцово-кислотных, никель-кадмиевых (Ni-Cd), никель-металлгидридных (Ni-MH) и литий-ионных (Li-ion) аккумуляторов: деградация активного материала, структурные изменения электродов, дисбаланс в процессах зарядки и температурная чувствительность. Для каждой технологии разработан универсальный критерий оценки состояния деградации, основанный на таких показателях, как потеря емкости, увеличение внутреннего сопротивления, различия в теплоотдаче и потеря эффективности. Также предложен комплексный диагностический индекс, позволяющий быстро оценить техническое состояние аккумуляторов на системном уровне. Представленный подход имеет практическое значение для повышения

ISSN 3030-3907

надежности, снижения эксплуатационных расходов и продления срока службы в системах хранения энергии, электромобилях и высокомощных резервных источниках питания.

Ключевые слова: деградация аккумулятора, свинцово-кислотный аккумулятор, диагностика, потеря емкости, внутреннее сопротивление, оценка, температура, заряд-разряд.

Annotation. This article presents an in-depth analysis of the chemical, mechanical, and electrochemical degradation processes occurring in high-capacity, multi-cell battery systems. It examines in detail the key factors affecting the service life of lead-acid, nickel-cadmium (Ni-Cd), nickel-metal hydride (Ni-MH), and lithium-ion (Li-ion) batteries, including active material degradation, structural changes in the electrodes, charging imbalances, and temperature sensitivity. A universal degradation assessment criterion has been developed for each technology, based on metrics such as capacity loss, increased internal resistance, differences in heat dissipation, and efficiency loss. A comprehensive diagnostic index has also been proposed, enabling a rapid system-level assessment of battery health. This approach has practical implications for improving reliability, reducing operating costs, and extending service life in energy storage systems, electric vehicles, and high-power backup power supplies.

Keywords: battery degradation, lead-acid battery, diagnostics, capacity loss, internal resistance, assessment, temperature, charge-discharge.

Kirish

So‘nggi yillarda yuqori sig‘imli va ko‘p funksiyali akkumulyator tizimlariga bo‘lgan ehtiyoj keskin ortib bormoqda. Elektr transport vositalarining ommalashuvi, qayta tiklanuvchi energiya manbalarini (quyosh va shamol) markazlashtirilmagan holda saqlash talabi, telekommunikatsiya infratuzilmasining uzluksiz ishlashi hamda sanoat energetikasining avtomatlashtirilishi ushbu tizimlarning ahamiyatini yanada oshirdi.

1-jadval

Akkumulyator batareyalarining solishtirma xarakteristikalari

Parametrlar	Qo‘rg‘oshin kislotali	Ni-Cad	Ni-MH	Li-ion
Solishtirma energiya zichligi, Vt·soat/kg	30-50	45-80	60-120	90-120
Ichki qarshiligi, Om	< 100 12 V li AKB bloki	100 – 200	200 – 300 12 V li AKB bloki	25 – 2500 12 V li AKB bloki

ISSN 3030-3907

		12 V li AKB bloki		
Hayotiy sikllari soni	200-300	1000	300-500	1000-2000
Tez zaryadlanish vaqti	8-16 soat	1 soat	2-4 soat	1 soat
O‘ta kuchlanishga bardoshliligi	yuqori	o‘rta	past	past
O‘z-o‘zini zaryadsizlash	5 %	20 %	30 %	10 %
Nominal kuchlanishi	2 V	1.2 V	1.2 V	3.3 V
Zaryadlana-yotganda kesish kuchlanisi	2.4 va 2.25 ga yaqin			3.6
Zaryadsizla-nayotganda kesish kuchlanisi	1.75	1.00	1.00	2.8
Yuklama tokening pik qiymati	5 C (0.2 C)	20 C (1 C)	5 C (0.5 C)	>30 C (<10 C)
Zaryadlanish harorati	-20^0C dan 50^0C gacha	0^0C dan 45^0C gacha		
Zaryadsiz-lanish harorati	-20^0C dan 50^0C gacha	-20^0C dan 65^0C gacha		-20^0C dan 60^0C gacha
Xizmat ko‘rsatish talab vaqti	3-6 oy (zaryadlansa)	30-60 kun (zaryad-sizlansa)	60-90 kun (zaryad-sizlansa)	Talab etilmaydi
Xavfsizlikka talab	Issiqlikga stabil	Issiqlikga stabil odatda issiqlik saqlagichlari qo‘llaniladi		Himoya konturi majburiy
Qachondan boshlab qo‘llaniladi	1800 yilni oxiridan buyon	1950	1990	1999

ISSN 3030-3907

Akkumulyatorlarning texnik holatini aniq baholash nafaqat ularning xavfsiz ishlashini ta’minlaydi, balki energetik samaradorlik, ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish va xizmat muddatini uzaytirishda ham asosiy omil sanaladi.

Akkumulyatorlar kimyoviy tuzulushiga asosan quyidagi – qo‘rg‘oshin-kislotali (Pb-H_2SO_4), Nikel kadmiyli (Ni-Cad), Nikel marganesli (Ni-MH), Litiy ionli (Li-ion) kabi katta guruhlarga bo‘linadi. Ularning solishtirma xarakteristikasi yuqoridagi 1-jadvalda keltirilgan[1,2,3].

Biroq elektr energiyasini saqlash uchun qo‘llaniladigan turli texnologiyalardagi akkumulyatorlar — qo‘rg‘oshin–kislotali Pb–H_2SO_4, Ni-Cd, Ni-MH va Li-ion tizimlari — o‘ziga xos kimyoviy, mexanik va elektrokimyoviy degradatsiya mexanizmlariga ega. Bu esa ularning holatini yagona mezon asosida baholashni murakkablashtiradi. Shuning uchun universal, ammo har bir texnologiyaning xususiyatlarini inobatga olgan holda moslashtiriladigan diagnostika usullarini ishlab chiqish dolzarb masalaga aylanmoqda. Mazkur tadqiqot aynan ushbu muammoni bartaraf etishga qaratilib, turli akkumulyator turlarining degradatsiyasini baholash uchun umumiy, tizimli va amaliy jihatdan qo‘llash mumkin bo‘lgan mezonlar majmuasini yaratishni maqsad qiladi [4,5,6].

Asosiy qism. Akkumulyator degradatsiyasi — bu ionlarning fizik-kimyoviy xususiyatlari vaqt o‘tishi bilan o‘zgarib, uning sig‘imi, kuchlanishi, ichki qarshiligi va energiya samaradorligining pasayishi jarayonidir. Degradatsiya ikki turga bo‘linadi[5,6]:

1. *Siklik degradatsiya* – ko‘plab zaryadlanish-zaryadsizlanish sikllaridan keyin yuzaga keladi.

2. *Kalendar degradatsiya* – akkumulyator ishlatilmay turgan holatda ham vaqt o‘tishi bilan ro‘y beradi.

Har xil kimyoviy tizimlarda degradatsiya tezligi, sabablari va tashqi omillarga sezgirligi turlicha bo‘ladi. Shuning uchun universal, lekin bir vaqtning o‘zida moslashuvchan baholash mezonini ishlab chiqish amaliy jihatdan juda muhim.

Qo‘rg‘oshin-kislotali akkumulyatorlarning degradatsiyasi – Qo‘rg‘oshin-kislotali (Pb–H_2SO_4) batareyalar ilk texnologiyalardan biri hisoblanadi. Ularning degradatsiyasi quyidagi omillar bilan bog‘liq bular:

– *sulfatlanish* zaryadlanish jarayonida hosil bo‘lgan $PbSO_4$ kristallari normal sharoitda tez erib ketadi. Ammo chuqur zaryadsizlanishda uzoq muddat qolish yoki yuqori haroratning ta’siri kristallarning kattalashuviga olib keladi. Natijada elektrod faolligi kamayadi;

– *aktiv massa yo‘qolishi* elektrodlarning mexanik mustahkamligi pasayib, aktiv qatlam parchalanadi. Bu jarayon sig‘im kamayishining asosiy sabablaridan biridir;

ISSN 3030-3907

– *elektrolitning zichligi pasayishi* elektrolit konsentratsiyasi kamaygan sari kuchlanish barqarorligi buziladi va ichki qarshilik ortadi.

Degradatsiya me'zonlari $PbSO_4$ uchun:

– sig'im yo'qolishi: 20–40%

– ichki qarshilik o'sishi: 15–30%

– zaryad samaradorligi: 80–90%

Ni-Cd akkumulyatorlarda degradatsiya – nikel-kadmiy akkumulyatorlarning o'ziga xos jihati — "xotira effekti"ning mavjudligidir. Bu jarayon elektrod tuzilishining o'zgarishi natijasida yuzaga keladi.

Xotira effekti – agar akkumulyator to'liq zadyadsizlanish qilinmasdan zaryadlanaversa, u o'zining avvalgi maksimal sig'imini "unutadi". Bu jarayon asosan $Cd(OH)_2$ kristallarining kattalashuvi bilan bog'liq.

Elektrod passivlanishi – elektrod yuzasida gidroksid qatlamlarining hosil bo'lishi ion almashinuvi tezligini sekinlashtiradi.

Gaz hosil bo'lishi – zaryadning yuqori kuchlanishda amalga oshirilishi kislorod bosimining oshishiga va akkumulyatorning shishishiga olib keladi.

Ni-Cd uchun asosiy degradatsiya me'zoni parametrlari:

– sig'imning pasayishi: 10–30%;

– ichki qarshilik ortishi: 20%+;

– samaradorlik: 70–85%;

Ni-MH akkumulyatorlarda degradatsiya – Ni-MH batareyalar ekologik jihatdan xavfsizroq, ammo issiqlikka sezgirligi yuqori.

Metall gidrid qotishmalarning korroziyasi – vodorod ionlari elektrod strukturasi bilan reaksiyaga kirishib, uning mexanik mustahkamligini pasaytiradi.

Elektrolit bug'lanishi – uzoq muddat yuqori temperaturada ishlash elektrolitning yo'qolishiga, natijada ichki qarshilikning tez oshishiga olib keladi.

Diffuzion yo'qotishlar – ionlarning elektrodlarda diffuziya tezligi pasayishi kuchlanishning pastlashiga olib keladi.

Ni-MH uchun mezonlar:

– sig'im yo'qolishi: 15–35%;

– ichki qarshilikning tez o'sishi: 25–40%;

– haroratga sezgirlik: yuqori;

Li-ion akkumulyatorlar degradatsiyasi – Li-ion akkumulyatorlar zamonaviy energiya tizimlarida eng ko'p qo'llaniladi. Ular eng yuqori energiya zichligiga ega bo'lsada, murakkab kimyoviy jarayonlarga ega.

Qattiq elektrolitlararo oraliq qatlami qalinlashuvi – Zaryad jarayonida grafit anod yuzasida *qattiq elektrolitlararo oraliq qatlami* shakllanadi. U haddan tashqari qalinlashganda ichki qarshilik oshadi.

ISSN 3030-3907

Litiy ionlarining mahkamlanishi – litiy ionlari elektrod tuzilishida “qamalib” qoladi va zaryad jarayonida ishtirok eta olmaydi. Bu sig‘imning sekin pasayishiga olib keladi.

Elektrolit degradatsiyasi – Yuoqri kuchlanish va haroratda elektrolit oksidlanadi, gazlar hosil bo‘ladi va batareya shishadi.

Li-ion uchun mezonlar:

– sig‘im yo‘qolishi: 10–25%;

– ichki qarshilik ortishi: 10–20%;

– elektr zaryadlanish samaradorligi: 98% dan pasayishi xavf belgisi;

Tahlillar asosida barcha akkumulyatorlar uchun umumiy bo‘lgan to‘rtta indikator tanlandi:

1. Sig‘im yo‘qolishi;
2. Ichki qarshilikning ortishi
3. Haroratning barqarorligi — ΔT
4. Zaryad/razryad samaradorligi

Bu parametrlar batareya holatini 90–95% aniqlikda baholash imkonini beradi.

Kompleks Texnik holat indeksini (THI) hisoblash

Turli xildagi akkumulyatorlar uchun yagona diagnostika mezoni sifatida THI quyidagicha aniqlanadi:

$$THI_{indeks} = 0{,}45C_{THI} + 0{,}30\,R_{THI} + 0{,}10\left(1 - \frac{\Delta T}{T_{normal}}\right) + 0{,}15_{samaradorlik} \quad (1)$$

bu yerda:

– C_{THI} – akkumulyatorning sig‘im holati ko‘rsatkichi, ya’ni nominal sig‘imga nisbatan amaldagi sig‘im darajasini ifodalovchi normallashtirilgan kattalik;

– R_{THI} – akkumulyatorning ichki qarshilik holati ko‘rsatkichi, ichki qarshilikning nominal qiymatga nisbatan o‘zgarishini tavsiflaydi;

– ΔT – akkumulyator ish jarayonida kuzatiladigan harorat og‘ishi, ya’ni amaldagi harorat bilan me’yoriy harorat orasidagi farq;

– T_{normal} – akkumulyator uchun belgilangan me’yoriy (ruxsat etilgan) ish harorati;

– $\left(1 - \frac{\Delta T}{T_{norma}}\right)$ – issiqlik barqarorligi ko‘rsatkichi, harorat rejimining me’yoriy holatdan og‘ishini hisobga oladi;

– $\eta_{samaradorlik}$ – akkumulyatorning energetik samaradorligi, ya’ni zaryadlashlanish-zaryadsizlanish jarayonlarida energiya yo‘qotishlari darajasini ifodalaydi;

– 0,45; 0,30; 0,10; 0,15 – har bir parametrning THI indeksiga ta’sir darajasini belgilovchi og‘irlik koeffitsiyentlari bo‘lib, ularning yig‘indisi 1 ga teng.[6,7,8].

Mezonga asoslangan baholashda quyidagicha ifodalanadi:

2-jadval

ISSN 3030-3907

THI_{indeks}	Batareya holati
> 85%	Sog‘lom
70–85%	Qoniqarli
50–70%	Xizmat muddati tugamoqda
< 50%	Avariya holati, almashtirish zarur

Xulosa. Turli xildagi akkumulyatorlar — qo‘rg‘oshin kislotali (Pb-H_2SO_4), Nikel kadmiyli (Ni-Cad), Nikel marganesli (Ni-MH), Litiy ionli (Li-ion) — o‘ziga xos degradatsiya mexanizmlariga ega bo‘lsa-da, ularning texnik holatini baholash mezonlarini umumlashtirish mumkin. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, THI_{indeks} modeli yordamida barcha texnologiyadagi akkumulyatorlar yagona mezon asosida samarali baholanishi mumkin. Shu bilan birga, sig‘im yo‘qolishi, akkumulyatorning sog‘ligini aniqlashda eng ishonchli va sezgir indikator sifatida xizmat qiladi. Shuningdek, harorat farqi va ichki qarshilikning keskin o‘zgarishi akkumulyatorning xavfli degradatsiya jarayoni borligini bildiradi va diagnostikada ogohlantiruvchi belgi sifatida qabul qilinadi. Mazkur yondashuv akkumulyatorlarning xizmat muddatini bashoratlash, xavfsiz ishlashini ta’minlash va energiya saqlash tizimlarining samaradorligini oshirish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Murodov X.Sh., Ataullayev N.O., Qarshiboyev A.I Elektr energiya yig‘uvchi moslamalarning turlari va ularni muvozanatli zaryadlash usullarining tahlili// E3S Web of Conferences 548, 03012 (2024).

2. Khasan Murodov and Askarbek Karshibayev, Development of the management system of technical indications of high-power charger-discharger rectifier device. // E3S Web Conf. Volume 417, 2023 III International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources (GEOTECH-2023).

3. Муродов Хасан Шухратович, Каршибаев Аскарбек Илашевич, Норкулов Аслиддин Олимович. Анализ устройств непрерывного элекрического питания на Навойской тепловой станции. // Innovative developments and research in education International scientific-online conference

4. N. O. Ataullaev, E. A. Dziaruhina, Kh. Sh. Murodov. Static Characteristics of Magnetic Modulation DC Converters with Analog Filter. // Science and Technique. International Scientific and Technical Journal. 22, № 5 (2023). ISSN 2414-0392

5. Рыкованова А. С. «Системы баланса Li-on аккумуляторных батарей» (журнал «Силовая электроника», 2009, №1).

6. А. С. Рыкованов, С. С. Беляев // Компоненты и технологии. – 2014. – № 3. – С. 121–124.

ISSN 3030-3907

7. А.П.Иншакова, Ю.Б.Федотова, С.С.Десяева и Д.В.Байкина «Проблема мониторинга и балансировки аккумуляторных батарей транспортных средств», (журнал «Инженерные технологии и системы» 2016 году)
8. M. Ufert, B. Bäker, Battery Ageing as Part of the System Design of Battery Electric Urban Bus Fleets. // Ufert M., Baker B. (2020) Battery Ageing as Part of the System Design of Battery Electric Urban Bus Fleets. Science and Technique. 19 (1), 12–19.

ISSN 3030-3907