ELEKTROMOBIL LITIY-ION BATAREYALARIDA SUN'IY INTELLEKT ASOSIDAGI ISSIQLIK BOSHQARUVI: ZAMONAVIY BTMS TEXNOLOGIYALARINING QIYOSIY TAHLILI

Saparbayev Jamshid Sattor o‘g‘li
Matematika fani o’qituvchisi
John1998xaker@gmail.com
Baxtiyorov Sarvarjon Zafar o‘g‘li
11-"B" sinf o'quvchisi
bakhtiyarovvs7@gmail.com
Toshkent Irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi aniq fanlarga ixtisoslashtirilgan maktab

Annotatsiya: *Ushbu maqolaning maqsadi elektromobillarda qo'llaniladigan litiy-ion batareyalar uchun zamonaviy issiqlik boshqaruv tizimlarini qiyosiy tahlil qilish hamda sun'iy intellektning BTMS (Battery Thermal Management System) boshqaruvidagi istiqbollarini baholashdan iborat. Tadqiqot ilmiy adabiyotlarni tahlil qilish va ko'p mezonli qiyosiy baholash usullariga tayangan. Havo, suyuqlik, fazani o'zgartiruvchi material (PCM), gibrid va sun'iy intellekt bilan boshqariladigan BTMS yechimlari issiqlikni chiqarish qobiliyati, harorat bir xilligi, yordamchi energiya sarfi, konstruktiv murakkablik va o'zgaruvchan iqlimga moslashuv mezonlari bo'yicha solishtirildi. Tahlil shuni ko'rsatadiki, barcha ekspluatatsiya sharoitlari uchun yagona universal sovutish usuli mavjud emas: havo sovutishi soddaligi bilan, suyuqlik sovutishi yuqori issiqlik yuklamalaridagi samaradorligi bilan, PCM esa qisqa muddatli issiqlik cho'qqilarini passiv yutish xususiyati bilan ajralib turadi. Gibrid tizimlar va sun'iy intellekt asosidagi prognozlovchi boshqaruv ushbu afzalliklarni birlashtirib, sovutishni faqat harorat oshgandan keyin emas, balki oldindan moslashtirish imkonini beradi. Maqolada o'zgaruvchan issiq-sovuq sharoitlar uchun sensorlar, prognozlash modeli va boshqariladigan sovutish konturidan tashkil topgan soddalashtirilgan AI-BTMS konsepsiyasi taklif etilgan.*

Kalit so'zlar: *elektromobil, litiy-ion batareya, BTMS, issiqlik boshqaruvi, sun'iy intellekt, mashinaviy o'rganish, PCM, gibrid sovutish, thermal runaway, energiya samaradorligi.*

Аннотация: *Целью статьи является сравнительный анализ современных систем терморегулирования литий-ионных аккумуляторов электромобилей и оценка перспектив применения искусственного интеллекта в управлении BTMS (Battery Thermal Management System). Исследование основано на обзоре научной литературы и многокритериальном сравнении технологий. Воздушные, жидкостные, PCM, гибридные и интеллектуально управляемые BTMS сопоставлены по эффективности отвода тепла, равномерности температуры, вспомогательному энергопотреблению, конструктивной сложности и адаптивности к изменяющимся климатическим условиям. Показано, что универсального способа охлаждения для всех режимов эксплуатации не существует: воздушное охлаждение отличается простотой,*

жидкостное - эффективностью при высоких тепловых нагрузках, а PCM - способностью пассивно поглощать кратковременные тепловые пики. Гибридные системы и прогнозное управление на основе искусственного интеллекта позволяют объединять данные преимущества и заранее корректировать режим охлаждения. Предложена упрощенная концепция AI-BTMS, включающая сеть датчиков, модель прогнозирования температуры и управляемый контур охлаждения.

Ключевые слова: *электромобиль, литий-ионная батарея, BTMS, тепловое управление, искусственный интеллект, машинное обучение, PCM, гибридное охлаждение, тепловой разгон, энергоэффективность.*

Abstract: *This paper comparatively evaluates modern thermal management approaches for lithium-ion batteries in electric vehicles and examines the prospects of artificial-intelligence-assisted BTMS control. The study is based on a focused literature review and a multi-criteria comparison of air cooling, liquid cooling, phase change material (PCM) systems, hybrid configurations, and AI-assisted thermal management. The technologies are assessed in terms of heat-removal capability, temperature uniformity, auxiliary energy demand, design complexity, and adaptability to changing ambient conditions. The analysis shows that no single cooling method is universally optimal. Air cooling remains attractive for its simplicity, liquid cooling is more suitable for high thermal loads, and PCM can passively absorb short-term heat peaks. Hybrid solutions combined with predictive AI control can integrate these advantages and adjust cooling proactively rather than only reacting to temperature rise. A simplified AI-BTMS concept consisting of sensor inputs, a temperature-prediction model, and an actively controlled cooling loop is proposed for variable hot and cold operating conditions.*

Keywords: *electric vehicle, lithium-ion battery, BTMS, thermal management, artificial intelligence, machine learning, PCM, hybrid cooling, thermal runaway, energy efficiency.*

Elektromobil texnologiyalarining tez rivojlanishi avtomobilsozlikdagi asosiy muhandislik vazifalaridan birini - katta sig'imli batareyalarni xavfsiz, samarali va uzoq muddat ishlatish masalasini - yanada dolzarb qildi. Xalqaro energetika agentligi ma'lumotiga ko'ra, 2025-yilda elektromobillar uchun batareya joylashtirilishi 1,2 TWh ga yetib, 2024-yilga nisbatan qariyb 30 foizga oshgan. Bu ko'rsatkich elektr transport vositalari bilan bog'liq batareya texnologiyalarining global energetika tizimidagi o'rni tobora kuchayayotganini ko'rsatadi. [1]

Elektromobillarda litiy-ion batareyalar yuqori energiya zichligi, qayta zaryadlanish imkoniyati va nisbatan uzoq siklik resursi sababli keng qo'llaniladi. Biroq batareyaning elektr xususiyatlari haroratga sezgir: past haroratda ichki qarshilik ortishi va foydali quvvatning kamayishi kuzatilishi mumkin, yuqori haroratda esa elektrokimyoviy qarish jarayonlari tezlashib, xavfsizlik zaxirasi qisqaradi. Turli batareya kimyosi va ishlab chiqaruvchi talablariga ko'ra optimal diapazon farq qiladi, lekin zamonaviy BTMSning vazifasi haroratni batareya uchun qulay va bir tekis oraliqda ushlab turishdan iborat. [2,5,7]

Shuning uchun BTMS oddiy 'sovutgich' emas. U batareya elementlarining haroratini kuzatadi, kerak bo'lganda sovutadi yoki isitadi, elementlar orasidagi harorat tafovutini

kamaytiradi va BMS bilan birgalikda xavfsiz ishlash chegaralarini nazorat qiladi. So'nggi tadqiqotlarda sun'iy intellekt va mashinaviy o'rganish usullaridan foydalanib, haroratning kelajakdagi o'zgarishini oldindan hisoblash, nasos yoki ventilyator ishini moslashtirish, nosozlik belgilarini erta aniqlash va energiya sarfini optimallashtirishga katta e'tibor berilmoqda. [3,8]

Tadqiqot ilmiy-tahliliy sharh shaklida bajarildi. Asosiy manbalar sifatida 2024-2026-yillarda chop etilgan BTMS, elektromobil batareyalari, gibrid sovutish va sun'iy intellekt asosidagi boshqaruv bo'yicha sharh maqolalari hamda IEAning 2026-yilgi Global EV Outlook hisobotidan foydalanildi.[1-8]

Qiyoslash uchun beshta mezon tanlandi:1) issiqlikni chiqarish qobiliyati; 2) batareya elementlari orasidagi harorat bir xilligi; 3) yordamchi energiya sarfi; 4) tizimning konstruktiv murakkabligi; 5) issiq va sovuq muhitga moslashuvchanligi. Mazkur mezonlar bo'yicha havo, suyuqlik, PCM, gibrid va AI yordamida boshqariladigan gibrid BTMSlar sifat jihatidan taqqoslandi. Bunda 'yuqori', 'o'rta' va 'past' baholari aniq bir ishlab chiqaruvchining ko'rsatkichini emas, ko'rib chiqilgan adabiyotlarda qayd etilgan umumiy tendensiyani bildiradi.

Past harorat elektromobil batareyasining quvvat berish va zaryad qabul qilish qobiliyatiga ta'sir qilishi mumkin. Sovuqda ionlarning elektrolit bo'ylab harakati sekinlashadi, ichki qarshilik ortadi va avtomobil batareyani isitish uchun qo'shimcha energiya sarflashi mumkin. Natijada bir zaryadda bosib o'tiladigan masofa kamayadi. Zamonaviy avtomobillarda issiqlik nasoslari, elektr isitkichlar va elektr motor yoki kuch elektronikasidan chiqadigan ortiqcha issiqlikni qayta ishlatish kabi yechimlar ushbu yo'qotishlarni kamaytirishga xizmat qiladi. [5,7]

Yuqori haroratda boshqa muammo yuzaga keladi: batareyadagi yon reaksiyalar va materiallarning degradatsiyasi tezlashadi. Harorat juda yuqori bo'lsa, mahalliy qizish nuqtalari paydo bo'lishi, elementlar orasidagi harorat tafovuti kengayishi va xavfsizlik chegarasi qisqarishi mumkin. Eng xavfli holatlardan biri thermal runaway - ya'ni issiqlik hosil bo'lishi o'z-o'zini kuchaytiradigan jarayondir. BTMSning vazifasi bunday holatga olib boruvchi sharoitlarni erta aniqlash va issiqlikni tez chiqarib yuborishdir. [2,4,6]

Demak, faqat maksimal haroratni pasaytirish yetarli emas. Batareya blokining barcha elementlari imkon qadar bir xil haroratda ishlashi ham muhim. Bir qismning muntazam ravishda issiqroq ishlashi uning tezroq eskirishiga, sig'imlar farqining ortishiga va butun batareya paketining imkoniyatini eng zaif element cheklashiga olib kelishi mumkin. Shu sababli zamonaviy tadqiqotlarda maksimal harorat bilan birga haroratlar farqi (ΔT) ham asosiy baholash ko'rsatkichlaridan biri sifatida qaraladi. [3,4]

Zamonaviy BTMS texnologiyalari

1. Havo bilan sovutish

Havo bilan sovutish BTMSning eng sodda yechimlaridan biridir. Ventilyator yordamida batareya modullari orasidan havo o'tkazilib, hosil bo'lgan issiqlik tashqi muhitga chiqariladi. Tizimning afzalligi - konstruksiya soddaligi, massaning nisbatan kichikligi va suyuqlik konturi talab qilinmasligidir. Shu bilan birga, havoning issiqlik sig'imi va issiqlik o'tkazish

qobiliyati suyuqlikka nisbatan past bo'lgani sababli yuqori quvvatli tez zaryadlash yoki katta issiqlik yuklamasida samaradorlik cheklanishi mumkin. [4,6,7]

2. Suyuqlik bilan sovutish

Suyuqlik bilan sovutish tizimlarida sovutish plitasi yoki kanallar orqali maxsus issiqlik tashuvchi suyuqlik aylanadi. Bu usul katta issiqlik oqimini nisbatan ixcham hajmda chiqarishga imkon beradi va yuqori quvvatli elektromobillarda keng qo'llanishi mumkin. Kamchiliklari esa nasos, quvurlar, issiqlik almashtirgich va germetik ulanishlarga ehtiyoj tufayli tizimning murakkablashishi, yordamchi energiya sarfi hamda sizib chiqish xavfidir. [2,4,5]

3. Faza o'zgaruvchi materiallar (PCM)

PCM asosidagi passiv BTMS materialning erish jarayonida katta miqdordagi yashirin issiqlikni yutish xususiyatidan foydalanadi. Batareya qiziganda PCM fazasini o'zgartirib, haroratning tez ko'tarilishini vaqtincha sekinlashtiradi. Uning katta afzalligi - nasos yoki ventilyator kabi doimiy energiya sarflaydigan qurilmasiz ishlashi. Biroq oddiy PCMlarning issiqlik o'tkazuvchanligi past bo'lishi mumkin va ular uzoq davom etuvchi yuqori yuklamada to'yinganidan so'ng issiqlikni faol ravishda tashqariga chiqarishga muhtoj bo'ladi. Shu sababli grafit, grafen, h-BN yoki boshqa issiqlik o'tkazuvchan qo'shimchalar bilan modifikatsiyalangan kompozit PCMlar faol o'rganilmoqda. [4,5]

4. Gibrid BTMS

Gibrid BTMS ikki yoki undan ortiq usulni birlashtiradi. Masalan, suyuqlik + PCM tizimida PCM qisqa muddatli issiqlik cho'qqilarini yutadi, suyuqlik konturi esa issiqlikni tashqi muhitga uzluksiz olib chiqadi. Shu tarzda passiv va faol usullarning kuchli tomonlari bir tizimda ishlaydi. 2025-yilgi sharhlar gibrid arxitekturalarni yuqori quvvat, tez zaryadlash va harorat bir xilligiga talab kuchli bo'lgan sharoitlar uchun istiqbolli yo'nalish sifatida ko'rsatmoqda. [4,5]

Mazkur qiyoslash asosida haroratlari mavsum va ekspluatatsiya rejimiga qarab keskin o'zgarishi mumkin bo'lgan sharoitlarda gibrid tizim yanada moslashuvchan platforma yaratishini ko’rishimiz mumkun. Biroq uning foydasi boshqaruv algoritmi yetarlicha aqlli bo'lgandagina to'liq namoyon bo'ladi: aks holda nasos va ventilyatorlar ortiqcha ishlashi, energiya sarfi oshishi mumkin. Shuning uchun gibrid BTMSni sun'iy intellekt bilan bog'lash keyingi mantiqiy bosqich sifatida qaraladi.

Sun'iy intellekt asosidagi BTMS

An'anaviy termostat boshqaruvi odatda harorat ma'lum chegaraga yetgandan keyin sovutishni kuchaytiradi. Sun'iy intellekt asosidagi yondashuv esa joriy harorat bilan birga zaryad holati (SOC), tok, kuchlanish, C-rate, tashqi harorat, avtomobil yuklamasi va oldingi vaqt oralig'idagi o'zgarishlarni tahlil qilib, haroratning bir necha soniya yoki daqiqadan keyingi holatini oldindan baholashi mumkin. Bunday prognoz boshqaruv tizimiga sovutishni kechiktirmasdan, lekin keragidan ortiq ishlatmasdan boshqarish imkonini beradi. [3,8]

2026-yilda e'lon qilingan AI-BTMS bo'yicha keng qamrovli sharhda ANN, Random Forest, SVM/SVR, LSTM va CNN kabi modellar haroratni prognozlash, xavfli holatlarni aniqlash va ko'p maqsadli optimallashtirish uchun qo'llanayotgani ko'rsatiladi. Mualliflar AI

modellari hisoblash xarajatini kamaytirib, sovutish samaradorligi, energiya sarfi, xavfsizlik va konstruktiv cheklovlar o'rtasidagi muvozanatni topishda foydali ekanini qayd etadilar. [3]

O’zbekiston iqlimi kabi issiq yoz va sovuq qish almashinadigan hududlarda BTMS faqat sovutish vazifasiga yo'naltirilsa yetarli bo'lmaydi. Qishda batareya oldindan isitilishi, yozda esa tez va bir tekis sovutilishi kerak. Shu nuqtai nazardan quyidagi konseptual yechimni maqsadga muvofiq hisoblaydi: suyuqlik konturi asosiy faol issiqlik tashuvchi sifatida, PCM qisqa muddatli issiqlik cho'qqilarini yumshatuvchi passiv element sifatida, sun'iy intellekt esa barcha rejimlar o'rtasida boshqaruvchi qatlam sifatida ishlaydi.

Masalan, tashqi harorat yuqori va avtomobil tez zaryadlanayotgan bo'lsa, AI modeli batareya harorati xavfli chegaraga yaqinlashishini oldindan aniqlab, sovutish suyuqligi oqimini kuchaytiradi. Yuklama kamaygach esa nasos tezligini pasaytirib, yordamchi energiya sarfini qisqartiradi. Sovuq sharoitda esa tizim batareyani zaryadlashdan yoki yuqori quvvat talabidan oldin kerakli darajada isitish rejimiga o'tishi mumkin. Bunday boshqaruvning maqsadi maksimal sovutish emas, balki minimal energiya sarfi bilan xavfsiz harorat va kichik ΔT ni saqlashdir. [3,5]

Ushbu tavsiya real avtomobil uchun tayyor sanoat konstruksiyasi emas, balki keyingi tajriba va simulyatsiya ishlari uchun konseptual modeldir. Uning afzalligi shundaki, kelajakdagi o'quvchi tadqiqotida modelni bosqichma-bosqich tekshirish mumkin: dastlab Excel yoki Python muhitida harorat prognozi, keyin kichik sensorli maket, undan so'ng sovutish rejimlarini boshqarish algoritmi. Bu maqolada bayon qilingan nazariy tahlilni keyingi amaliy loyiha bilan bog'lash imkonini beradi.

So'nggi adabiyotlar BTMS rivojlanishida uchta asosiy tendensiyani ko'rsatmoqda. Birinchisi - bitta sovutish usulidan gibrid arxitekturaga o'tish. Ikkinchisi - tizimni faqat batareya bilan cheklamasdan, elektr motor, kuch elektronika va salon issiqlik tizimi bilan integratsiyalash. Uchinchi yo'nalish - ma'lumotga asoslangan boshqaruv, ya'ni AI, digital twin va real vaqt monitoringi yordamida tizimning kelajak holatini prognozlashdir. [2,3,5]

Litiy-ion batareyalarning ishlashi harorat bilan bevosita bog'liq bo'lib, juda sovuq muhitda quvvat va yurish masofasi pasayishi, yuqori haroratda esa degradatsiya va xavfsizlik xavflari ortishi mumkin. Shuning uchun elektromobil uchun BTMS batareyaning ikkilamchi qurilmasi emas, balki uning samaradorligi va xavfsizligini ta'minlovchi asosiy tizimlardan biridir.

Qiyosiy tahlil havo, suyuqlik va PCM texnologiyalarining har biri ma'lum sharoitda foydali ekanini, biroq universal optimal yechim mavjud emasligini ko'rsatdi. Havo sovutishi sodda va yengil, suyuqlik sovutishi katta issiqlik yuklamasida samarali, PCM esa energiya sarflamasdan qisqa muddatli harorat cho'qqilarini pasaytiradi. Gibrid tizimlar ushbu imkoniyatlarni birlashtiradi, lekin ularning murakkabligini samarali boshqarish talab qilinadi.

Sun'iy intellekt aynan shu boshqaruv vazifasida katta imkoniyatga ega. Sensor ma'lumotlari asosida haroratni oldindan prognozlash, sovutish intensivligini moslashtirish va nosozlikni erta aniqlash orqali AI-BTMS energiya samaradorligi va xavfsizlik o'rtasidagi muvozanatni yaxshilashi mumkin. Mazkur maqolada taklif etilgan sensor - prognoz - qaror - qayta aloqa tamoyiliga asoslangan soddalashtirilgan AI-BTMS konsepsiyasi keyingi amaliy yoki simulyatsion tadqiqot uchun asos bo'la oladi.

Shunday qilib, kelajak elektromobillarida asosiy vazifa faqat 'batareyani sovutish' emas, balki batareyaning issiqlik holatini oldindan biladigan, tashqi sharoitga moslashadigan va energiyani oqilona sarflaydigan aqlli termal boshqaruv tizimini yaratishdan iborat. Bu yo'nalish avtomobilsozlik, energetika va sun'iy intellektning kesishgan nuqtasidagi eng istiqbolli tadqiqot mavzularidan biri hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yhati:

1. International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2026: Electric vehicle batteries. Paris: IEA, 2026. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026/electric-vehicle-batteries

2. Dhanasekaran A., Subramanian Y., Le M.T., Dhanasekaran R., Muhammed Ali S.A., Gubendiran R.K., Raj V., Yassin H., Azad A.K. Battery thermal management systems for electric vehicles: A review of current status, opportunities, and future challenges. Journal of Energy Storage, 2026, 166, 122330. https://doi.org/10.1016/j.est.2026.122330

3. Nandakishora Y., Khayum N., Patra C., Kumar P., Sharma A., et al. AI driven approaches in battery thermal management systems for prediction and multi objective optimization: a comprehensive literature review. Discover Mechanical Engineering, 2026, 5, 53. https://doi.org/10.1007/s44245-026-00231-w

4. Moghadasi M., Zarnoush M., Esmaeilion F., Radman G., Soltani M. Advancements and challenges in battery thermal management technologies for electric vehicles; a systematic navigation on the latest trends. Results in Engineering, 2025, 27, 105830. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105830

5. Togun H., Basem A., Mohammed H.I., Sadeq A.M., Biswas N., Abdulrazzaq T., Hasan H.A., Homod R.Z., Talebizadehsardari P. A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles: Enhancing performance, sustainability, and future trends. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 97, 1077-1107. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.093

6. Akkus F., Isik M.Z. A review of thermal management systems of lithium-ion batteries used in electric vehicles. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2025, 12(6), 1763-1783. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2025.06.002

7. Hwang F.S., Confrey T., Reidy C., Picovici D., Callaghan D., Culliton D., Nolan C. Review of battery thermal management systems in electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 192, 114171. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114171

8. Ali Z.M., Jurado F., Gandoman F.H., Calasan M. Advancements in battery thermal management for electric vehicles: Types, technologies, and control strategies including deep learning methods. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(9), 102908. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102908