Registered in Germany Europa Revue Journal
ISSN: 1862-6564 Vol. 6 No. 10 (2026) Published October 30, 2026

DEVELOPING A METHOD FOR DETERMINING THE DECELERATION OF ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES DURING BRAKING

Raxmonov A. S.

Associate Professor, Department of Intelligent Transport Systems, Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Uzbekistan

Allabayev K. A.

First-year student, Group MITT-1-26, Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Uzbekistan

Abstract

A method for determining the deceleration of electric and hybrid vehicles during braking is proposed; its relevance is supported by post-2023 statistics (over 20 million electric cars sold worldwide in 2025; 122.7 thousand registered electric vehicles in Uzbekistan by 1 July 2026). Because braking force is shared between regenerative and friction brakes in a way that depends on battery state of charge, speed and control software, the method fuses inertial, GNSS, wheel-speed and CAN-bus data with a Kalman filter and splits the total deceleration into its regenerative and friction parts. Performance is demonstrated in a simulation study; full-scale road tests remain future work.

Keywords

electric car, hybrid car, regenerative braking, deceleration, longitudinal dynamics, mixed braking, energy balance, measurement uncertainty.

Elektromobil va gibrid avtomobillarning tormoz jarayonida sekinlashishini aniqlash uslubini ishlab chiqish

Raxmonov.A.S

Intellektual transport tizimlari kafedra dotsenti Toshkent davlat transport universiteti «TDTU» Toshkent Shahri, O‘zbekiston

Allabayev.K.A

1 - kurs talabasi, guruh MITT-1-26 Toshkent davlat transport universiteti «TDTU» Toshkent Shahri, O‘zbekiston

qosbergena@gmail.com, +998940131924

Annotatsiya. Maqolada elektromobil va gibrid avtomobillar tormozlanganda sekinlashishni aniqlash uslubi taklif etilgan. Bunday avtomobillarda tormozlovchi kuch ikki manbadan hosil bo‘ladi: tortuvchi elektr mashinasining rekuperativ tormozlashidan va odatdagi ishqalanish tormozlaridan. Ularning nisbati batareya zaryad darajasiga, tezlikka va boshqaruv dasturiga qarab o‘zgaradi, shuning uchun sekinlashishni faqat pedal yo‘li yoki gidravlik bosim orqali baholash yetarli emas. Mavzuning dolzarbligi 2023-yildan keyingi statistika bilan asoslangan: 2025-yilda jahonda 20 mln dan ortiq elektromobil sotilgan [1], O‘zbekistonda ro‘yxatga olingan elektromobillar soni 2026-yil 1-iyulga kelib 122,7 ming taga yetgan [3]. Taklif etilgan uslub inersial o‘lchash bloki, GNSS, g‘ildirak tezligi datchiklari va CAN-shina ma’lumotlarini Kalman filtri yordamida birlashtiradi hamda sekinlashishning umumiy qiymatini ham, uning rekuperativ va ishqalanish tashkil etuvchilarini ham beradi. Uslub hisobiy (modelli) tajribada tekshirildi: filtr sekinlashishni 0,06 m/s² o‘rtacha kvadratik xatolik bilan tikladi, o‘rtacha to‘liq rivojlangan sekinlashish esa taxminan 1,2 % xatolik bilan aniqlandi.

Kalit so‘zlar: elektromobil, gibrid avtomobil, rekuperativ tormozlash, sekinlashish, bo‘ylama dinamika, aralash tormozlash, energiya balansi, o‘lchash noaniqligi.

Kirish. Elektromobil va gibrid avtomobillarda tormozlanish mexanik energiyaning friksion mexanizmlarda issiqlikka aylanishi hamda elektr mashinasi orqali batareyaga qaytarilishi bilan kechadi. Bunda umumiy tormoz kuchi bir nechta manba hisobiga shakllanadi, ularning imkoniyatlari esa tezlik, elektr mashinasining momenti va batareyaning zaryad qabul qilish holatiga bog‘liq. Shu sababli energiya qaytarish ulushi yuqori bo‘lgan rejim har doim ham talab etilgan sekinlashishni ta’minlay olmaydi.

Yin va hammualliflar [1] rekuperativ boshqaruvda motor momenti, batareya quvvati, tezlik va zaryad darajasini cheklovlar sifatida hisobga olgan. Geng va hammualliflar [2] gibrid avtomobil uchun elektr va mexanik tormozlarni muvofiqlashtiruvchi boshqaruvni tadqiq etgan. Berjoza va hammualliflar [3] shahar harakatida rekuperativ tormozlanish xususiyatlarini tajribaviy o‘rgangan.

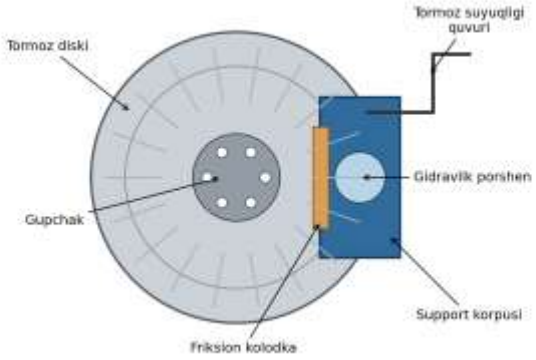
Tadqiqot maqsadi — elektromobil va gibrid avtomobillarning tormozlanishidagi sekinlashishni aniqlash uchun kuchlar balansi, tezlik signali va energiya hisobini

birlashtiruvchi uslubni ishlab chiqish. Ishning metodik hissasi bir xil parametr ta’riflari va vaqt shkalasida kinematik hamda dinamik baholarni solishtirish, rekuperativ cheklovlarning ta’sirini ajratish va natijaning metrologik talqinini belgilashdan iborat. EV va HEV bo‘yicha natijalar tanlangan ikki konfiguratsiya doirasida taqqoslanadi.

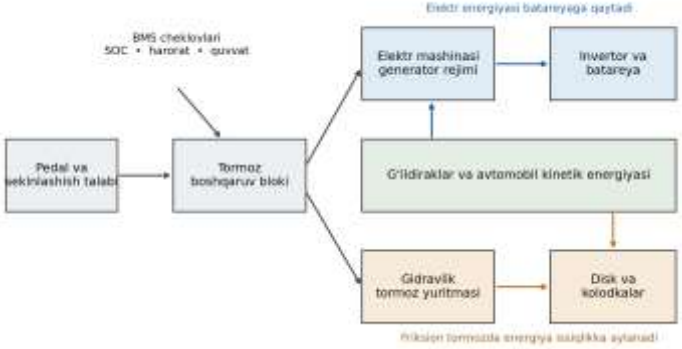
2 Materiallar va metodlar

2.1 Tormoz tizimi va tadqiqot obyekti

Tadqiqot obyekti — elektr mashinasi va friksion mexanizmlar birgalikda tormoz kuchi hosil qiladigan yengil avtomobilning bo‘ylama harakati. EV batareyali elektromobilni, HEV gibrid elektr avtomobilni bildiradi. Friksion mexanizmda energiya issiqlikka aylanadi; rekuperativ yo‘lda esa mexanik energiyaning bir qismi elektr energiyasi sifatida batareyaga qaytariladi. Tizimlarning funksional farqi 1 va 2-rasmlarda keltirilgan.



1-rasm. Diskli friksion tormozning asosiy qismlari. Muallifning soddalashtirilgan tuzilish sxemasi.



2-rasm. Rekuperativ va friksion tormozlashda boshqaruv signallari hamda energiya oqimining funksional sxemasi.

Friksion tormozning real qismlari va gibrid avtomobilning motor bo‘limi 3–4-rasmlarda ko‘rsatilgan. Suratlar konstruktiv tasavvur beradi; hisobdagi EV va HEV parametrlarini ushbu avtomobillarga tenglashtirish uchun asos bo‘lmaydi.



3-rasm. Disk ustiga qo‘yilgan demontaj qilingan avtomobil tormoz supportlari va gidravlik ulanishlar. Kolodkalar o‘rnatilmagan.



4-rasm. Toyota Prius gibrid avtomobilining motor bo‘limi.

HEV hisobida ichki yonuv dvigateli transmissiyadan uzilgan holat tanlandi. Shu orqali elektr va friksion komponentlar ta’siri alohida kuzatiladi. Dvigatel transmissiyaga ulangan holatga o‘tishda uning qarshilik momenti va uzatma holati modelga qo‘shimcha kiritilishi talab etiladi. Hisoblarda tormoz yuritmasining o‘tish jarayoni va ABS faoliyati modellashtirilmadi.

Hisoblash ssenariysi va boshlang‘ich parametrlar. Barcha sonli natijalar shartli ikki konfiguratsiya uchun hisoblandi. Boshlang‘ich tezlik $v_0 = 60/3{,}6 = 16{,}667$ m/s; talab

etilgan sekinlashish adem = 3,0 m/s²; yo‘l tekis. Transmissiya koeffitsiyenti $\eta_t = 0{,}95$ va g‘ildirak radiusi rw = 0,30 Integrallash qadami 0,001 s; oxirgi qadam to‘xtash vaqtiga mos qisqartirildi. Yo‘l va energiya o‘rtacha qadam tezligi bilan integrallandi.

1-jadval.

Belgilangan model parametrlari

Parametr	**EV**	**HEV**
Massa m, kg	1800	1500
Ekvivalent massa m_e, kg	1872	1560
Motor momenti Tmax, N·m	180	110
Uzatish soni i	9	8
Batareya quvvat chegarasi, kW	45	25
Qaytarish samaradorligi η_r	0,85	0,80

EV boshlang‘ich holatida dumalash qarshiligi 0,012 × 1800 × 9,81 = 211,90 N, aerodinamik qarshilik 0,5 × 1,225 × 0,65 × 16,667² = 110,59 N. Jami qarshilik 322,49 N; talab etilgan tormoz kuchi 1872 × 3 − 322,49 = 5293,51 N bo‘ladi.

$$F_{r,T} = \frac{180 \times 9 \times 0.95}{0.30} = 5130 \text{ N} \qquad (11)$$

$$F_{r,P} = \frac{45000}{0.85 \times 16.667} = 3176.47 \text{ N} \qquad (12)$$

$$F_f = 5293.51 - 3176.47 = 2117.04 \text{ N} \qquad (13)$$

Demak, 60 km/soat tezlikda EV rekuperatsiyasi quvvat chegarasi bilan cheklanadi. Faqat rekuperatsiyada boshlang‘ich sekinlashish (3176,47 + 322,49)/1872 = 1,869 m/s². HEV uchun mos hisobda qarshilik 287,17 N, rekuperativ kuch 1875 N, friksion to‘ldirish 2517,83 N va faqat rekuperatsiyadagi sekinlashish 1,386 m/s² chiqadi.

$$t_{stop} = \frac{v_0}{a_{dem}} = 5.556 \text{ s}, \quad s_{stop} = \frac{v_0^2}{2a_{dem}} = 46.296 \text{ m} \qquad (14)$$

Bu yo‘l tormoz kuchi shakllangan ideal boshlang‘ich nuqtadan hisoblangan. Haydovchi reaksiyasi va yuritma kechikishi kiritilmagan. Masalan, alohida 0,3 s kechikish faraz qilinsa, shu oraliqda o‘zgarmas tezlik uchun yana 5,0 m qo‘shiladi; bu qiymat hisoblangan tormoz yo‘liga tegishli emas.

3.1 Sekinlashish va to‘xtash ko‘rsatkichlari

Aralash tormozlashda friksion kuch yetishmovchilikni ideal tarzda to‘ldirgani uchun EV va HEVning tezlik egri chiziqlari ustma-ust tushadi. Faqat rekuperativ rejimda tezlik pasaygani sari quvvatga bog‘liq kuch chegarasi ortadi, keyin moment chegarasi ustun bo‘ladi. Kichik tezlikda φ(v) kamayishi hisobiga elektr tormoz kuchi susayadi.

3.1.1 Tezlik va to‘xtash ko‘rsatkichlarining hisobiy bahosi

Aralash rejimda a_β = 3,0 m/s² bo‘lgani sababli tezlikning analitik yechimi olinadi. Masalan, t = 2,0 s dagi tezlik va to‘xtash ko‘rsatkichlari quyidagicha hisoblanadi:

$$v(2)=\frac{60}{3.6}-3\cdot 2=10.667 \text{ m/s}=38.40 \text{ km/h}$$

$$t_{stop}=\frac{16.667}{3}=5.556 \text{ s}, \qquad s_{stop}=\frac{16.667^2}{2\cdot 3}=46.296 \text{ m}$$

Faqat rekuperativ rejimda sekinlashish o‘zgaruvchan: har bir qadamda kuchlar qayta hisoblanadi. EV uchun birinchi qadamda a_0 = 1,86910 m/s²; Δt = 0,001 s bo‘lganda:

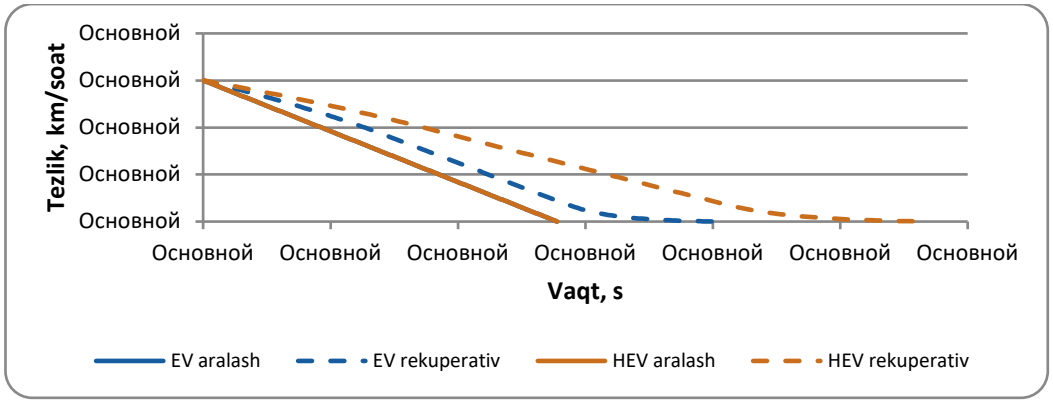
$$v_1=16.666667-1.869102\cdot 0.001=16.664798 \text{ m/s}$$

$$\Delta s_0=\frac{16.666667+16.664798}{2}\cdot 0.001=0.016666 \text{ m}$$

2-jadval.

Tezlik grafigining hisoblangan tayanch nuqtalari

t, s	Aralash, km/soat	EV rekuperativ, km/soat	HEV rekuperativ, km/soat
0,0	60,00	60,00	60,00
2,0	38,40	44,86	49,25
4,0	16,80	24,92	36,20
6,0	0,00	4,83	22,39
8,0	0,00	0,03	8,68



Aralash rejimda EV va HEV uchun bir xil to‘xtash yo‘li hosil bo‘lishi belgilangan sekinlashishni friksion kuch bilan to‘ldirish shartidan kelib chiqadi. Ushbu shartning bajarilishi kuchlar taqsimotiga bog‘liq: 60 km/soat boshlang‘ich tezlikda EV uchun zarur 5293,51 N tormoz kuchining 2117,04 N qismi, ya’ni 40,0 foizi friksion mexanizm bilan ta’minlanadi. HEVda 4392,83 N talabning 2517,83 N qismi, ya’ni 57,3 foizi friksion kuchga to‘g‘ri keladi. Demak, umumiy sekinlashish teng bo‘lsa ham, aktuatorlar yuklanishi va energiya yo‘llari sezilarli farq qiladi.

Xulosa

Elektromobil va gibrid avtomobillarning tormozlanish jarayonida sekinlashishini aniqlash uchun bo‘ylama dinamika, tezlik signali va energiya balansiga asoslangan uslub ishlab chiqildi. Uslub aylanuvchi qismlarning ekvivalent massasi, tashqi qarshiliklar, yo‘l qiyaligi, elektr mashinasining moment chegarasi hamda batareyaning quvvat qabul qilish imkoniyatini yagona hisoblash tizimida birlashtiradi. Natijada umumiy sekinlashish bilan birga uni ta’minlovchi rekuperativ va friksion kuchlar alohida baholanadi.

Rekuperativ tormozning ta’siri tezlikka bog‘liq bo‘lib, yuqori tezlikda quvvat, o‘rta tezlikda moment, kichik tezlikda esa elektr tormozning susayishi bilan cheklanadi. Tanlangan konfiguratsiyalarda moment va quvvat cheklovlari tenglashadigan tezliklar EV uchun 37,15 km/soat, HEV uchun 40,37 km/soat bo‘ldi. Bu chegaralar kuch egri chiziqlarining fizik mazmunini ochib beradi va rekuperativ ulushni butun tormozlanish davomida o‘zgarmas deb qabul qilish asosli emasligini ko‘rsatadi.

60 km/soat boshlang‘ich tezlik va 3,0 m/s² talab etilgan sekinlashishda ideal aralash tormozlash vaqti 5,56 s, yo‘li 46,30 m ni tashkil etdi. Mazkur natija friksion

mexanizmning rekuperativ kuch yetishmovchiligini to‘liq va kechikishsiz qoplashi sharti bilan olinadi. Boshlang‘ich tezlikda friksion komponent zarur tormoz kuchining EV uchun 40,0 foizini, HEV uchun 57,3 foizini ta’minladi. Shu sababli umumiy sekinlashishning tengligi ikki tizimning aktuator yuklanishi yoki energiya samaradorligi tengligini anglatmaydi.

Faqat rekuperativ rejimda boshlang‘ich sekinlashish EV uchun 1,869 m/s², HEV uchun 1,386 m/s² bo‘lib, belgilangan talabdan kichik chiqdi. To‘xtash yo‘li mos ravishda 57,78 va 81,49 m gacha, ya’ni aralash rejimga nisbatan 24,81 va 76,02 foizga ortdi. Tanlangan sharoitda elektr tormozning o‘zi zarur dinamikani ta’minlay olmagani friksion to‘ldirishning funksional ahamiyatini ko‘rsatadi.

Aralash rejimda batareyaga qaytgan energiya EV uchun 171,62 kJ, HEV uchun 91,66 kJ bo‘ldi; qaytarish ulushi boshlang‘ich ekvivalent kinetik energiyaning 66,0 va 42,3 foizini tashkil etdi. Faqat rekuperativ rejimda energiya qaytarish oshgan bo‘lsa-da, to‘xtash yo‘li ham uzaydi. Demak, tormoz tizimini baholashda energiya qaytarish maksimumi mustaqil yakuniy mezon sifatida qo‘llanmaydi. U talab etilgan sekinlashish, to‘xtash yo‘li va harakat barqarorligi cheklovlari doirasida baholanishi zarur.

Vaqt qadamini 0,010 s dan 0,001 s gacha kamaytirish hisoblangan to‘xtash yo‘lini 0,031 foizdan kam o‘zgartirdi. Bu natija tanlangan model doirasida diskretlash ta’siri kichik ekanini ko‘rsatadi, ammo modelning haqiqiy avtomobilga mosligini o‘z-o‘zidan tasdiqlamaydi. Keyingi bosqichda uslub kalibrlangan tezlik va inersial o‘lchovlar, motor hamda batareya signallari bilan tajribaviy tekshirilishi kerak. Aktuator kechikishi, o‘qlar bo‘yicha yuk ko‘chishi, shina–yo‘l tutashuvi, ABS faoliyati va batareyaning harorat hamda zaryad holatini kiritish uslubning amaliy qo‘llanish sohasini kengaytiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

[1] Yin Z., Ma X., Zhang C., Su R., Wang Q. A Logic Threshold Control Strategy to Improve the Regenerative Braking Energy Recovery of Electric Vehicles. Sustainability. 2023;15(24):16850. DOI: 10.3390/su152416850.

[2] Geng C., Ning D., Guo L., Xue Q., Mei S. Simulation Research on Regenerative Braking Control Strategy of Hybrid Electric Vehicle. Energies. 2021;14(8):2202. DOI: 10.3390/en14082202.

[3] Berjoza D., Pirs V., Jurgena I. Research into the Regenerative Braking of an Electric Car in Urban Driving. World Electric Vehicle Journal. 2022;13(11):202. DOI: 10.3390/wevj13110202.

[4] Naseri F. Regenerative–Frictional Brake Blending in Electric Vehicles Considering Energy Recovery and Dynamic Battery Charging Limit: A Reinforcement Learning-Based Approach. Machines. 2026;14(4):416. DOI: 10.3390/machines14040416.

[5] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.

[6] JCGM GUM-6:2020. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 6: Developing and using measurement models. BIPM. DOI: 10.59161/JCGMGUM-6-2020.

Alison Cassidy, “Brake calipers.jpg”, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brake_calipers.jpg ; litsenziya: https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/ . Surat o‘zgartirilmagan.