

**TOSHKENT SHAHRIDAGI TURIN POLITEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/2026.10.04.T.46.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

TOSHKENT SHAHRIDAGI TURIN POLITEXNIKA UNIVERSITETI

ASANOV SEYRAN ENVEROVICH

**ELEKTR YURITMALI YENGIL AVTOMOBILNING REKUPERATIV
TORMOZLASH SAMARADORLIGINI ASOSLASH**

05.08.06 – G'ildirakli va gusenisali mashinalar va ularni ishlatish

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent-2026

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati
mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
техническим наукам**

**Abstract contents of dissertation of doctor of philosophy (PhD)
in technical sciences**

Asanov Seyran Enverovich

Elektr yuritmalı yengil avtomobilning rekuperativ tormozlash
samaradorligini asoslash..... 3

Асанов Сейран Энверович

Обоснование эффективности рекуперативного торможения в
автомобиле с электрическим приводом..... 27

Asanov Seyran Enverovich

Justification of the effectiveness of regenerative braking in light vehicles
with electric drive..... 51

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works 58

**TOSHKENT SHAHRIDAGI TURIN POLITEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/2026.10.04.T.46.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

TOSHKENT SHAHRIDAGI TURIN POLITEXNIKA UNIVERSITETI

ASANOV SEYRAN ENVEROVICH

**ELEKTR YURITMALI YENGIL AVTOMOBILNING REKUPERATIV
TORMOZLASH SAMARADORLIGINI ASOSLASH**

05.08.06 – G'ildirakli va gusenisali mashinalar va ularni ishlatish

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent-2026

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/T4296 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent shahridagi Turin politexnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezюме)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.turin.uz) ba «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: Inoyatxodjayev Jamshid Shuxratullayevich
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: Alimuxamedov Shavkat Pirmuxamedovich
texnika fanlari doktori, professor

Mirzaliyev Sanjar Mahamadjon o'gli
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot: Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat
texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/2026.10.04.T.46.02 raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil «02» 11 soat 16⁰⁰ da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100095, Toshkent sh, Kichik Xalqa Yo'li, 17-uy, Tel.: (99871) 203-07-77, e-mail: info@polito.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent shahridagi Turin politexnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 126 raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100095, Toshkent sh, Kichik Xalqa Yo'li, 17-uy. Tel.: (99871) 203-07-77, e-mail: info@polito.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil «20» 10 kuni tarqatildi.
(2026-yil «02» 09 da 11 - raqamli reestr bayonnomasi).



O.A.To'ychiyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash raisi, t.f.d., dotsent

J.J.Karimov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash kotibi, f-m.f.f.d., dotsent

S.K.Ro'zimov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash qoshidagi ilmiy seminar
raisi, t.f.d., dotsent

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda avtomobil ishlab chiqaruvchilar atrof-muhitga yetkaziladigan zararni kamaytirish uchun yanada ekologik toza transport vositalarini ishlab chiqish va ishlab chiqarishga katta e'tibor qaratmoqdalar. Bugungi kunda avtomobilsozlikni rivojlantirishning asosiy omillaridan biri elektr dvigatelli avtomobillardan foydalanishda energiyadan oqilona foydalanish va atrof-muhitni muhofaza qilishni ta'minlaydigan texnologiyalarni joriy etishdir. Shu munosabat bilan, energiya tejash darajasini oshirishga qaratilgan eng samarali tizimlardan biri gibrid elektromobillar va elektromobillardagi rekuperatsiya tizimidir. Shu sababli, energiya tejamkorlik darajasini oshirishga qaratilgan eng samarali tizimlardan biri gibrid elektromobillar va elektrokarlarda rekuperatsiya tizimi hisoblanadi. Ushbu tadqiqot elektr yuritma bilan jihozlangan transport vositalarida rekuperativ tormozlash (RT) nazariyasidan foydalangan holda muammoni tadqiq qilish va qisman hal qilishga yordam berishi bilan dolzarb hisoblanadi. Ushbu texnologiyadan foydalanish elektrlashtirilgan transport vositasining tortish akkumulyator batareyasiga sarflangan elektr energiyasining 25% gacha qismini qaytarish imkonini beradi.

Jahonda hozirgi vaqtda yirik avtomobil ishlab chiqaruvchilari avtomobilning klassik gidravlik tormoz tizimi va elektr yuritmasining rekuperativ tizimi o'rtasida tormozlash kuchini taqsimlash algoritmlarini ishlab chiqish orqali yoqilg'i tejamkorligini yaxshilash, shuningdek, zararli chiqindi gazlar miqdorini kamaytirish uchun yechimlarni topishga qaratilgan tadqiqotlarga katta e'tibor qaratmoqdalar. Jahon avtotransport vositalari bozorida tormozlash jarayonida avtomobil kinetik energiyasining bir qismini elektr energiyasiga aylantirish orqali o'zining tortish akkumulyator batareyalarini zaryadlash qobiliyatiga ega bo'lgan elektromobillar va gibrid elektromobillar alohida ahamiyatga ega.

Respublikamizda tabiiy xomashyo resurslaridan foydalanishda energiya tejamkorlik talablariga rioya qilishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Yuqoridagi talablarni bosqichma-bosqich amalga oshirish maqsadida 2022–2026-yillarda O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi¹ ishlab chiqilgan bo'lib, unda ishlab chiqarishda energiya tejovchi texnologiyalarni keng joriy etish, iqtisodiyotda energiya va resurslar sarfini kamaytirish zarurligi ta'kidlangan. Shu munosabat bilan, elektr yuritmalari transport vositalarini ishlab chiqish va ishlab chiqarish sohasida zamonaviy elektrlashtirilgan transport vositalariga joriy etiladigan energiya tejovchi va energiya samaradorligini oshiruvchi texnologiyalarni chuqur o'rganish zarurati tobora ortib bormoqda. Elektr transport vositalarining ekspluatatsion samaradorligi nafaqat tortish elektr yuritmasining texnik ko'rsatkichlari, balki harakat davomida hosil bo'ladigan kinetik energiyadan qanchalik samarali foydalanilishiga ham bevosita bog'liq. Shu nuqtai nazardan, tormozlash jarayonida transport vositasining kinetik energiyasini elektr energiyasiga aylantirib, uni tortish batareyasida qayta saqlash imkonini

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "Respublikani yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni (www.lex.uz)

beruvchi rekuperativ tormozlash tizimi elektr transport vositalarining energiya samaradorligini oshirishning muhim yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 19-dekabrdagi PQ-443-son "Elektromobillar ishlab chiqarishni tashkil etishni davlat tomonidan qo‘llab-quvvatlash chora-tadbirlari to‘g‘risida," 2022-yil 19-dekabrdagi PQ-444-son "Elektromobillardan foydalanish infratuzilmasini kengaytirish chora-tadbirlari to‘g‘risida," 2022-yil 2-dekabrdagi PQ-436-son "2030-yilgacha O‘zbekiston Respublikasining "yashil" iqtisodiyotga o‘tishiga qaratilgan islohotlar samaradorligini oshirish chora-tadbirlari to‘g‘risida," 2019-yil 4-oktyabrdagi PQ-4477-son "2019 - 2030-yillar davrida O‘zbekiston Respublikasining "yashil" iqtisodiyotga o‘tish strategiyasini tasdiqlash to‘g‘risida," 2019-yil 6-martdagi PQ-4230-son "Yuk va yo‘lovchi tashishni tubdan takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida," 2018-yil 6-martdagi PQ-3589-son "Avtomobil transportini boshqarish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida"gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishning asosiy ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot yo‘nalishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar rivojlanishining III. "Energetika, energiya va energiyatejamkorlik transport, mashina va asbobsozlik" ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Jahonning bir qator ilg‘or ilmiy markazlari, laboratoriyalari va ilmiy tadqiqot universitetlarida elektromobillarning mexatron tizimlari va ularning qo‘llanilishi bo‘yicha nazariy va amaliy tadqiqotlar olib borilmoqda. Elektromobillar va gibrid elektromobillarda regenerativ tormozlash tizimi va uning samaradorligini asoslash masalalari bilan xorijlik olimlardan G.Genta, S.Onori, L.Serrao, A.Tonoli, N.Amati, M.Giansoldati, A.Hughes, E.Schaltz, A.Noume, M.Risser, C.Vasile, A.Couliibaly, C. Harihari, E.Inci, H.Lee, Y.Lei, Sh.Ruan, Y.Fu, M.Josehio, J.Yang, Sh.Hu, M.Ehsani, Y.Gao, S.Chauhan, Q.Zhang, C. Yang, A.Aksyonov, V.Vodovozov, V.Ivanov, V.Ya.Dvadnenko, S.N.Dumnov va boshqalar shug‘ullanganlar.

O‘zbekistonda ushbu yo‘nalishda S.M.Qodirov, A.A.Muxitdinov, B.I.Bazarov, Sh.P.Alimuxammedov, S.K.Ro‘zimov, J.Sh.Inoyatxodjayev, G.Yaxshilikova, O.A.To‘ychiyev, F.Sh.Umerov, J.Mavlonov va boshqalar faol tadqiqot ishlarini olib borishgan.

Biroq, elektr yuritmalari yengil avtomobillarda rekuperativ tormozlashni asoslash bo‘yicha tadqiqotlar yetarli darajada o‘rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasi bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqotining asosiy qismi Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti, "O‘zavtosanoat" AJ qoshidagi Elektromobillar va ularning infratuzilmasi ilmiy-tadqiqot laboratoriyasida bajarilgan. Shuningdek, tadqiqotning bir qismi 101128065-"Yashil kelishuv doirasida barqaror transport" loyihasi doirasida amalga

oshirildi.

Tadqiqotning maqsadi elektr yuritmalı yengil avtomobilning dinamikasiga qo'yiladigan talablarnı hisobga olgan holda energiya samaradorligi va ekologik xavfsızlikning yuqori ko'rsatkichlariga erishish imkonini beruvchi rekuperativ tormozlash samaradorligini asoslashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

elektromobillarda zamonaviy rekuperativ tormozlash tizimlarining joriy ishlanmalari va tadqiqotlarini o'rganish;

elektr mashinali avtomobil harakatining matematik modelidan foydalanish, bu esa rekuperativ tormozlash tizimidan foydalangan holda me'yorlangan harakat sikllarida avtomobil harakatlanganda elektr energiyasi sarfini hisoblash imkonini beradi;

old va orqa yuritmalı avtomobillar uchun rekuperativ tormozlash tizimi yoqilgan holda turli yurish sikllarida elektr yuritmalı yengil avtomobilning bo'ylama harakati uchun MATLAB/Simulink yordamida imitatsion model yaratish;

elektromobillarda rekuperativ tormozlash tizimi tomonidan ishlab chiqariladigan energiya hajmiga ta'sir qiluvchi asosiy o'zgaruvchilarni aniqlash;

elektr yuritmalı avtomobilning ishlab chiqilgan bo'ylama harakat imitatsion modelining ishonchliligini baholash maqsadida eksperimental tadqiqot o'tkazish;

Tadqiqotning obyekti sifatida elektr orqa yuritmalı kichik klassli yengil avtomobil olingan.

Tadqiqotning predmeti elektr yuritma va u bilan bog'liq elektron boshqaruv tizimlaridan iborat.

Tadqiqot usullari. Tadqiqot elektr yuritmalı yengil avtomobillarda rekuperativ tormozlash tizimidan foydalanishda nazariy va eksperimental ishlarnı o'rganish va umumlashtirish, avtomobilning bo'ylama dinamikasini va uning energiya samaradorligini hisoblash usullari, tajriba usullari, nochiqli xarakterdagi regressiya tahlili, imitatsion modellash va matematik statistika usullarini o'z ichiga oladi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagılardan iborat:

avtomobilning bo'ylama dinamikasining matematik modeli va ishlab chiqilgan imitatsion model asosida harakatlanish sikllarida elektr yuritmalı kichik sinf avtomobilining energiya samaradorligi 35 foizgacha yaxshilangan;

elektr yuritmalı kichik sinf avtomobillarda ishqalanish va rekuperativ tizimlar o'rtasida tormoz kuchlarini taqsimlashga asoslangan rekuperativ tormozlash tizimini boshqarish algoritmi ishlab chiqilgan;

rekuperativ tormozlanish jarayonida ishlab chiqariladigan energiya miqdoriga ta'sir etuvchi asosiy omillar asoslangan;

avtomobil bo'ylama dinamikasi imitatsion modelining ishonchliligini dala sinovlari natijalari bilan taqqoslash orqali eksperimental baholash uslubiyati asoslangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagılardan iborat:

elektr yuritmalı kichik sinf avtomobilining tormozlanish jarayonida qayta tiklanadigan energiya miqdoriga ta'sir ko'rsatuvchi asosiy omillar (harakatlanish

sikllar, elektr yuritma, batareya, shinalar, boshqaruv algoritmlar) asoslangan;

elektr yuritmalik kichik sinf avtomobillarida qayta tiklanadigan energiya hajmini oshirish imkonini beruvchi regenerativ tormozlash tizimini boshqarish algoritmi ishlab chiqilgan;

tormozlanish jarayonida energiya samaradorligini oshirish uchun elektr yuritma joylashuvining (old va orqa uzatmalik) ahamiyati ko'rsatilgan;

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalari tajribalar, zamonaviy usullardan foydalanish hamda nazariy mexanika va oliy matematika tamoyillariga asoslangan parametrlar va ish rejimlarini nazariy asoslash bilan tasdiqlanadi.

eksperimental ma'lumotlar matematik-statistik usullar bilan qayta ishlanadi. Tadqiqot natijalarining ham ilmiy laboratoriyalarda, ham konstruktorlik markazlarida qo'llanilishi ularning o'zaro muvofiqligini tushuntiradi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Ushbu tadqiqot natijalari elektromobillarda rekuperativ tormozlanishning ilmiy ahamiyatini isbotlash uchun ishlatilishi mumkin.

tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati elektr yuritmalik yengil avtomobillarning rekuperativ tormozlash tizimini adaptiv boshqarish algoritmi ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi. Bundan tashqari, o'tkazilgan tadqiqotning amaliy ahamiyati zararli chiqindi gazlar chiqindilarini kamaytirishga, shuningdek, tormozlash jarayonida avtomobil kinetik energiyasining bir qismini qaytarish orqali avtomobilning energiya samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Elektr yuritmalik yengil avtomobilning rekuperativ tormozlash samaradorligini asoslashda olingan natijalar asosida:

elektr yuritmalik kichik sinf avtomobilining tormozlanish jarayonida qayta tiklanadigan energiya miqdoriga ta'sir ko'rsatuvchi asosiy omillar bo'yicha asoslanishi "BYD Uzbekistan Factory" MCHJ"da joriy etilgan ("O'zavtosanoat" AJning 2026-yil 23- iyundagi 20/04-25-1029-son ma'lumotnomasi). Natijada, ushbu omillar qaytarilgan energiya hajmini 35 foizgacha oshirishi mumkinligi ko'rsatildi.

elektr yuritmalik kichik sinf avtomobillarida qayta tiklanadigan energiya hajmini oshirish imkonini beruvchi regenerativ tormozlash tizimini boshqarish algoritmi "BYD Uzbekistan Factory" MCHJ"da joriy etilgan ("O'zavtosanoat" AJning 2026-yil 23- iyundagi 20/04-25-1029-son ma'lumotnomasi). Undan foydalanish bitta elektr yuritma bilan jihozlangan kichik toifadagi avtomobil 550 ming so'mgacha tejash imkonini beradi.

tormozlanish jarayonida energiya samaradorligini oshirish uchun elektr yuritma joylashuvining (old va orqa uzatmalik) ahamiyati "BYD Uzbekistan Factory" MCHJ"da joriy etilgan ("O'zavtosanoat" AJning 2026-yil 23- iyundagi 20/04-25-1029-son ma'lumotnomasi). Natijada, old g'ildirakli avtomobillar haydash sikliga qarab rekuperatsiya jarayonida energiyani 33-35% ga qaytarish imkoniyatiga ega bo'ldi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Ushbu dissertatsiya ishining asosiy

natijalari "O'zavtosanoat" AJga taqdim etildi; "BYD Uzbekistan Factory" MCHJ, Toshkent shahridagi Turin Politehnika universitetida; 13 ta xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya va seminarlarida.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 27 ta ilmiy ish chop etilgan. Shulardan 13 tasi ilmiy maqola O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan dissertatsiyalarning asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda e'lon qilingan, shu jumladan 4 tasi xorijiy (xalqaro) va 9 tasi respublika jurnallarida. Uchta ish xalqaro Scopus ma'lumotlar bazasiga kiritilgan konferensiya materiallari to'plamlarida chop etilgan. Qolgan 10 ta ish xalqaro va respublika ilmiy-texnik konferensiyalari materiallari to'plamlarida e'lon qilingan. Bundan tashqari, tadqiqot davomida hisoblash dasturiy mahsuloti uchun bitta mualliflik guvohnomasi (EHM uchun yaratilgan dasturning davlat ro'yxatidan o'tkazilganligi to'g'risidagi guvohnoma) olingan.

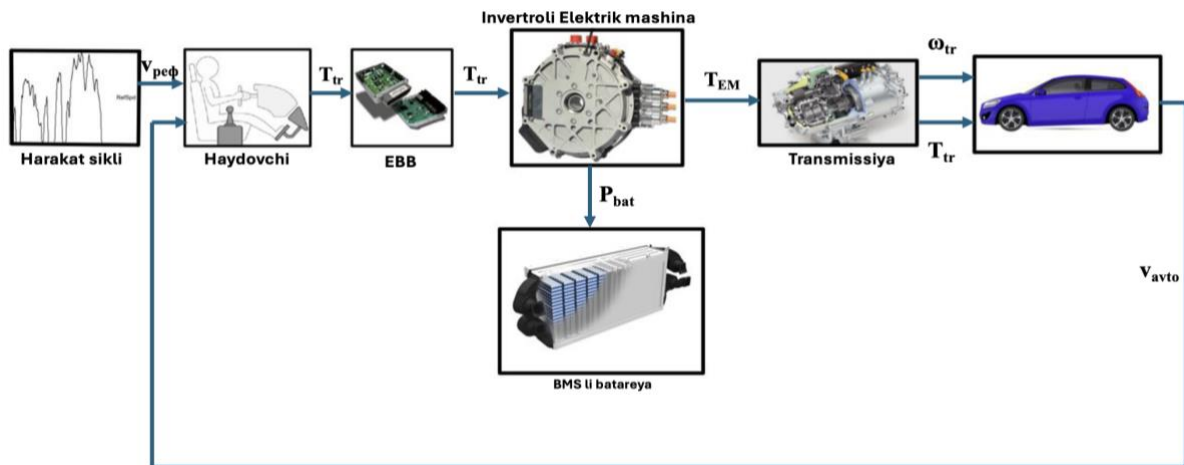
Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, umumiy xulosalar va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya ishining hajmi 120 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obyekti va predmeti tavsiflangan. Mavzuning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan xulosalarning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan. Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy qilinishi, ishning aprobatasiyasi, nashr etilgan ilmiy ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

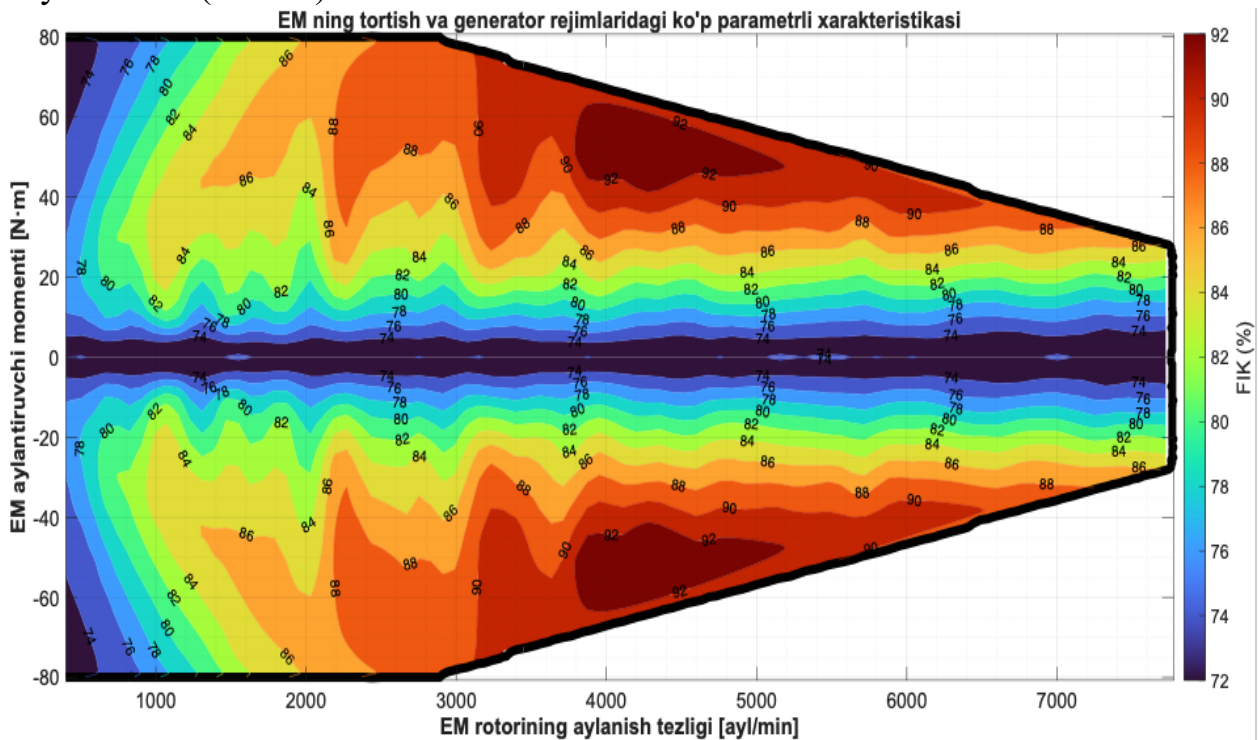
Dissertatsiyaning **"Avtomobil transporti ekologik xavfsizligi zamonaviy holatining tizimli tahlili"** deb nomlangan birinchi bobida yengil avtomobillarda tormoz tizimlarining evolyutsiyasi chuqur tahlil qilingan. Tormoz tizimlari uchun standartlar bo'yicha sharh o'tkazildi. Rekuperativ tormozlanishni boshqarish algoritmlari masalasi batafsil o'rganildi. Ushbu bobda rekuperatsiyani boshqarish rejimlari sohasidagi zamonaviy tendensiyalarning ilmiy sharhi amalga oshirilgan. Mavjud rejimlarning har biri ishlash prinsipi, afzalliklari va kamchiliklari, shuningdek, mumkin bo'lgan cheklovlari bo'yicha tavsiflangan. Amalga oshirilgan tahlillar asosida ilmiy tadqiqotning maqsad va vazifalari asoslab berilgan.

Dissertatsiyaning **"Avtomobil va uning energiya manbali tortish agregati bo'ylama dinamikasining matematik modeli"** deb nomlangan ikkinchi bobida elektr yuritmalari yengil avtomobil bo'ylama harakatining matematik modeli tavsiflangan. Bundan tashqari, MATLAB/Simulink dasturiy ta'minot paketida turli tormozlash rejimlarida va turli standartlashtirilgan harakat sikllarida rekuperativ tormozlashning energiya samaradorligini baholash uchun imitatsion model keltirilgan. Asosiy model sifatida 1-rasmda tasvirlangan elektr yuritmalari yengil avtomobilning to'g'ri modelidan foydalanildi.



1-rasm - Elektr yuritmalı yengil avtomobil bo‘ylama dinamikasining to‘g‘ridan-to‘g‘ri modeli.

Tortish agregatining matematik modelini tavsiflash uchun tortish/generator rejimida ishlovchi elektr mashinasining ko‘p parametrlı xarakteristikasidan foydalanildi (2-rasm).



2-rasm - Elektr mashinasining ko‘p parametrlı tavsifi.

2-rasmda tasvirlangan elektr mashinasining tavsifi yordamida, izlanayotgan ish rejimidagi FIKni hisobga olgan holda, tortish P_{mot} va generator P_{gen} rejimlarida mos ravishda talab qilinadigan quvvatni hisoblash mumkin:

$$\begin{cases} P_{mot} = \frac{T_{mot}\omega_{mot}}{\eta_{mot}}, \\ P_{gen} = \eta_{gen}T_{gen}\omega_{gen} \end{cases} \quad (1)$$

Elektr mashinasi foydali ish ko‘effitsiyentining izochiziqlari ikki o‘zgaruvchili ko‘phad bilan tavsiflanadi:

$$\begin{aligned}\eta_{mot} = & p_{00} + p_{10}\omega_{n.em} + p_{01}T_{n.em} + p_{20}\omega_{n.em}^2 + p_{11}\omega_{n.em}T_{n.em} \\ & + p_{02}T_{n.em}^2 + p_{30}\omega_{n.em}^3 + p_{21}\omega_{n.em}^2T_{n.em} + p_{12}\omega_{n.em}T_{n.em}^2 \\ & + p_{03}T_{n.em}^3 + p_{40}\omega_{n.em}^4 + p_{31}\omega_{n.em}^3T_{n.em} + p_{22}\omega_{n.em}^2T_{n.em}^2 \\ & + p_{04}T_{n.em}^4 + p_{50}\omega_{n.em}^5 + p_{41}\omega_{n.em}^4T_{n.em} + p_{32}\omega_{n.em}^3T_{n.em}^2 \\ & + p_{23}\omega_{n.em}^2T_{n.em}^3 + p_{14}\omega_{n.em}^1T_{n.em}^4 + p_{05}T_{n.em}^5\end{aligned}\quad (2)$$

p_{ij} approksimatsiya koeffitsiyentlari quyidagi qiymatlarga ega:

$$\begin{aligned}p_{00} = & 71.14; p_{10} = 10.9; p_{01} = -1.564; p_{20} = -144.5; p_{11} = 1087; p_{02} \\ & = 46.26; p_{30} = 393.7; p_{21} = -2848; p_{12} = -1946; p_{03} \\ & = -273.9; p_{40} = -375.4; p_{31} = 2195; p_{22} = 5055; p_{13} \\ & = 813; p_{04} = 460.4; p_{50} = 114.4; p_{41} = -456.4; p_{32} = -2517; p_{23} \\ & = -1972; p_{14} = 88.34; p_{05} = -234.1.\end{aligned}$$

p_{ij} koeffitsiyentlari ikki o'zgaruvchili regression tahlil yordamida aniqlangan.

Elektr mashinasining maksimal aylantiruvchi moment qiymati – uning ishlash sohasini chegaralovchi egri chiziq. Ushbu egri chiziq elektr mashinasi burchak tezligiga bog'liq funksiya bilan tavsiflanadi:

$$\begin{aligned}T_{mot.maks} = & -2932\omega_{em}^6 + 7317\omega_{em}^5 - 6378\omega_{em}^4 + 2251\omega_{em}^3 \\ & - 344.6\omega_{em}^2 + 21.16\omega_{em} + 79.67\end{aligned}\quad (3)$$

Tortish akkumulyator batareyasining matematik modeli Tevenin teoremasi yordamida, elektr yurituvchi kuch (EYK) E manbasini va ichki qarshilikni o'z ichiga olgan ochiq kontur sifatida ifodalangan. Quvvat manbalarining zaryadlash va razryad jarayonidagi turlicha xatti-harakati sababli tortish akkumulyator batareyasi modeli zaryad uchun R_{zar} va razryad uchun R_{raz} alohida qarshiliklarni nazarda tutadi. Ko'plab tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, bunday modellarda EYK va qarshiliklar bevosita batareyaning zaryadlanish darajasiga (SOC) bog'liq, ya'ni $E=f(SOC)$, $R_{zar}=f(SOC)$, $R_{raz}=f(SOC)$.

Ushbu model zaryadlashdagi I_{zar} va razryaddagi I_{raz} elektr tokini quyidagi formulalar yordamida hisoblash imkonini beradi:

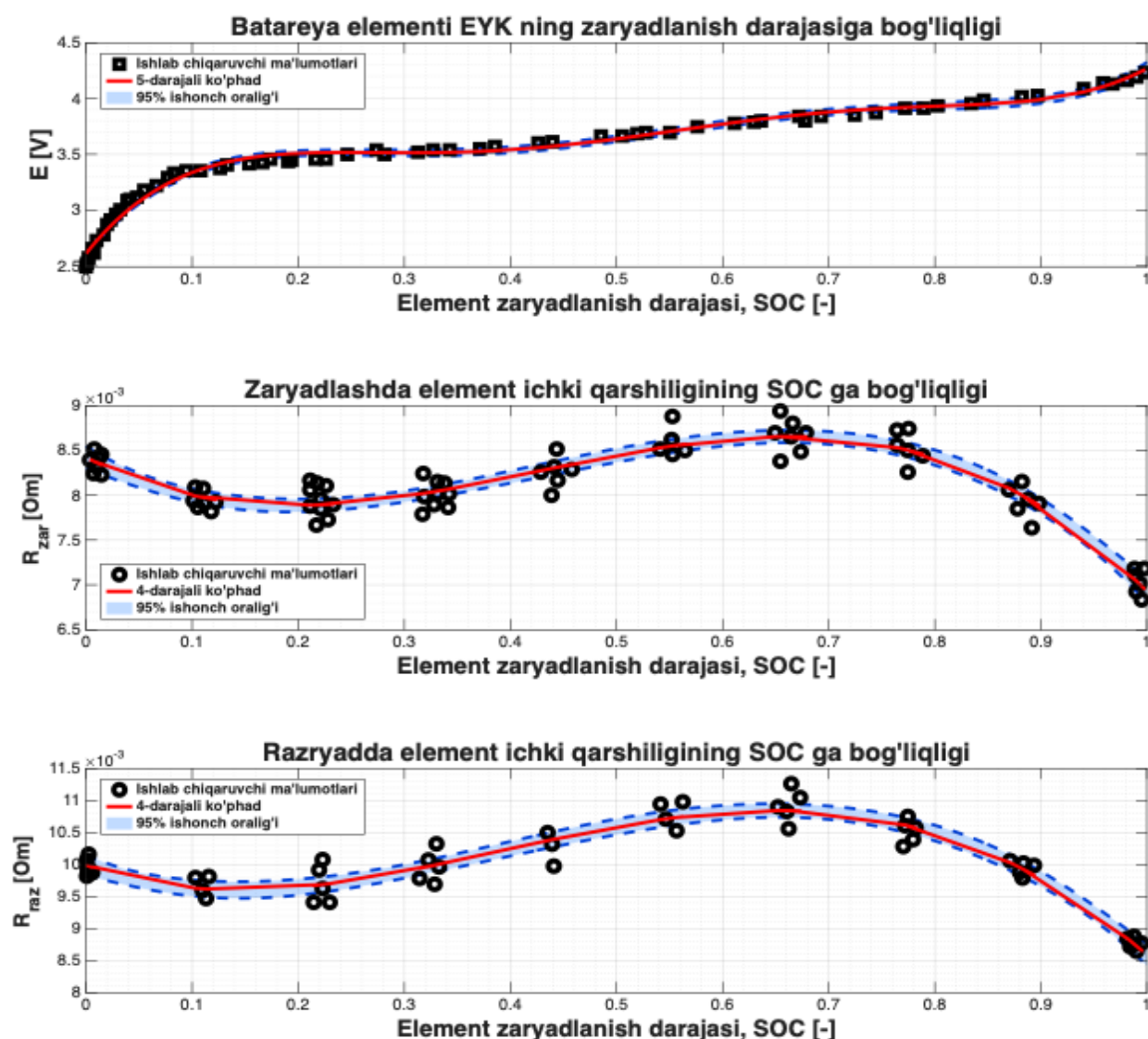
$$I_{raz} = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4R_{raz}P_t}}{2R_{zar}}\quad (4)$$

$$I_{zar} = \frac{\sqrt{E^2 + 4R_{zar}P_t} - E}{2R_{zar}}\quad (5)$$

Batareya zaryadlanish darajasining dinamik o'zgarishi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_0^{t^*} I_{raz} dt}{Q_{nom.As}} + \frac{\int_0^{t^*} I_{zar} dt}{Q_{nom.As}}\quad (6)$$

bu yerda SOC_0 – hisob boshlangan momentdagi batareya zaryadlanish darajasi, t^* –soniyalarda ifodalangan oxirgi hisob vaqti, $Q_{nom.As}$ – Amper-soniyalarda ifodalangan nominal sig'im.



3-rasm – Litiy-ionli batareyaning bitta elementi uchun EYK va ichki qarshiliklarning zaryadlanish darajasiga bog'liqligi

3-rasmda keltirilgan ma'lumotlarga ko'ra, batareyaning elektr yurituvchi kuchi va uning ichki qarshiliklari zaryadlash hamda razryad jarayonida zaryadlanish darajasiga bog'liq. Ushbu bog'liqliklarni matematik tarzda quyidagicha tavsiflash mumkin:

$$E(SOC) = 47.25SOC^5 - 129.79SOC^4 + 129.25SOC^3 - 57.88SOC^2 + 11.79SOC + 2.62 \quad (7)$$

$$R_{zar}(SOC) = 0.0002SOC^4 - 0.0017SOC^3 + 0.0019SOC^2 - 0.0005SOC + 0.0008 \quad (8)$$

$$R_{raz}(SOC) = 0.0005SOC^4 - 0.0028SOC^3 + 0.0028SOC^2 - 0.0006SOC + 0.001 \quad (9)$$

Bitta element uchun batareyaning EYK va ichki qarshiliklari bog'liqligiga oid yuqorida keltirilgan tavsiyalar berilgan. (10)-ifoda tortish akkumulyator batareyasini masshtablash va kuchlanish hamda sig'imning kerakli qiymatlariga erishish imkonini beradi:

$$\begin{cases} R_{zar} = R_{zap.\varepsilon\lambda} \frac{N_{ket}}{N_{par}} \\ R_{raz} = R_{raz.el} \frac{N_{ket}}{N_{par}} \\ E = E_{el} N_{ket} \\ Q_{nom.As} = Q_{nom.As.el} N_{par} \end{cases} \quad (10)$$

bu yerda N_{ket} — ketma-ket ulangan elementlar soni;

N_{par} — parallel ulangan elementlar soni.

Avtomobilning bo‘ylama dinamikasini (4-rasm) quyidagi differensial tenglama ((11)-tenglama) bilan tavsiflash mumkin:

$$m \frac{dv}{dt} = (F_{oldt} + F_{orqt}) - (F_{dumold} + F_{dumorq} + F_a + F_g), \quad (11)$$

bu yerda F_{oldt} — old g‘ildiraklardagi tortish (tormozlash) kuchi;

F_{orqt} — orqa g‘ildiraklardagi tortish (tormozlash) kuchi;

F_{dumold} — old g‘ildiraklardagi dumalanish ishqalanish kuchi;

F_{dumorq} — orqa g‘ildiraklardagi dumalanish ishqalanish kuchi;

F_a — aerodinamik qarshilik kuchi;

F_g — yo‘l qiyaligi tufayli qarshilik kuchi;

m — avtomobil massasi.

v — avtomobil tezligi;

α — yo‘l qiyaligi burchagi.

Avtomobilning old va orqa g‘ildiraklaridagi dumalanish ishqalanish kuchlarini yagona dumalanish ishqalanish kuchi F_k ga birlashtirish mumkin; uni quyidagi matematik ifoda ((12)-tenglama) bilan tavsiflash mumkin:

$$F_k = f_k m g \cos(\alpha), \quad (12)$$

bu yerda f_k — avtomobil shinasini va yo‘l yuzasi orasidagi dumalanish ishqalanish koeffitsiyenti.

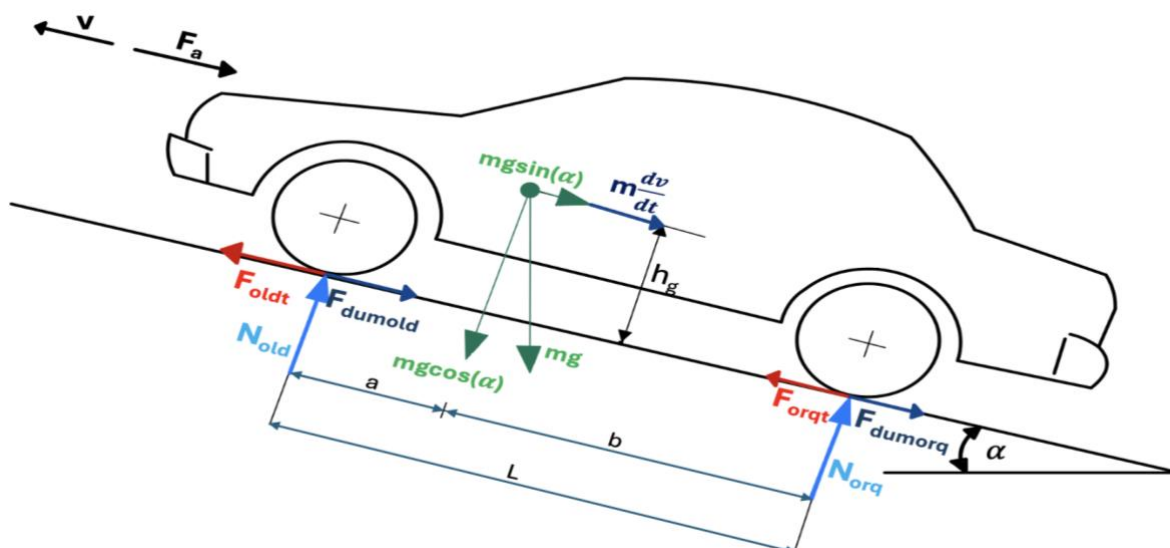
Aerodinamik qarshilik kuchi avtomobil tezligi v ga, aerodinamik old qarshilik koeffitsiyenti C_d ga, avtomobil old qismi proyeksiyasi yuzasi A ga va havo zichligiga bog‘liq. Aerodinamik qarshilik kuchi quyidagi ko‘rinishdagi matematik tenglama ((13)-tenglama) bilan tavsiflanadi:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A (v - v_{sh})^2, \quad (13)$$

bu yerda v_{sh} — avtomobil harakatiga mos shamol tezligining tashkil etuvchisi.

Qiyalik burchagi α bo‘lgan yo‘lda harakatlanayotgan avtomobilning bo‘ylama dinamikasini o‘rganishda harakatga og‘irlik kuchi tufayli yuzaga keladigan qarshilikni ham hisobga olish muhim. Bu yo‘l qiyaligi tufayli qarshilik kuchi F_g bo‘lib, u quyidagi tenglama ((14)-tenglama) bilan ifodalanadi

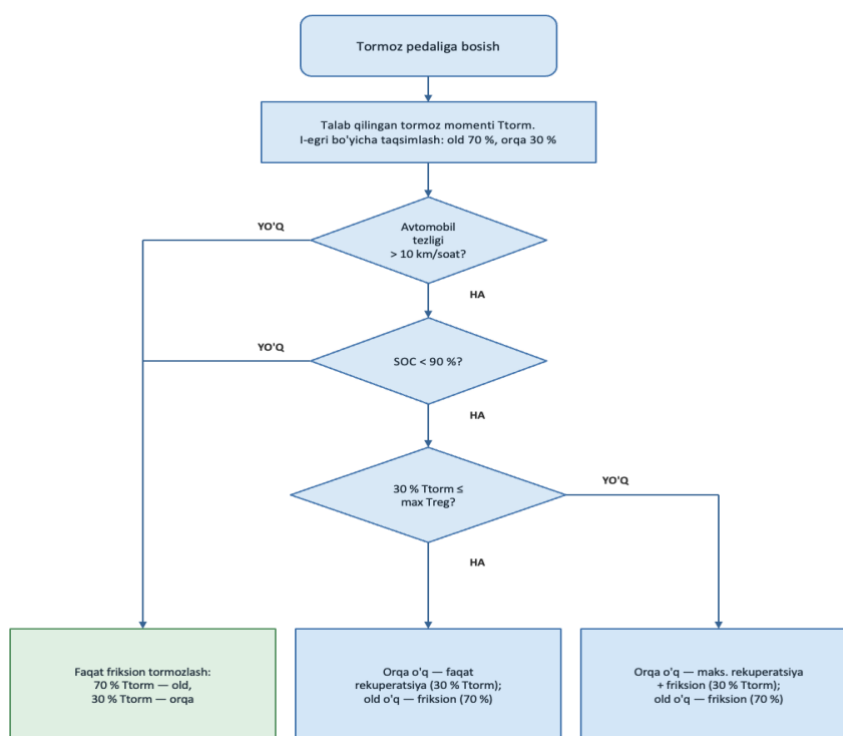
$$F_g = m g \sin(\alpha) \quad (14)$$



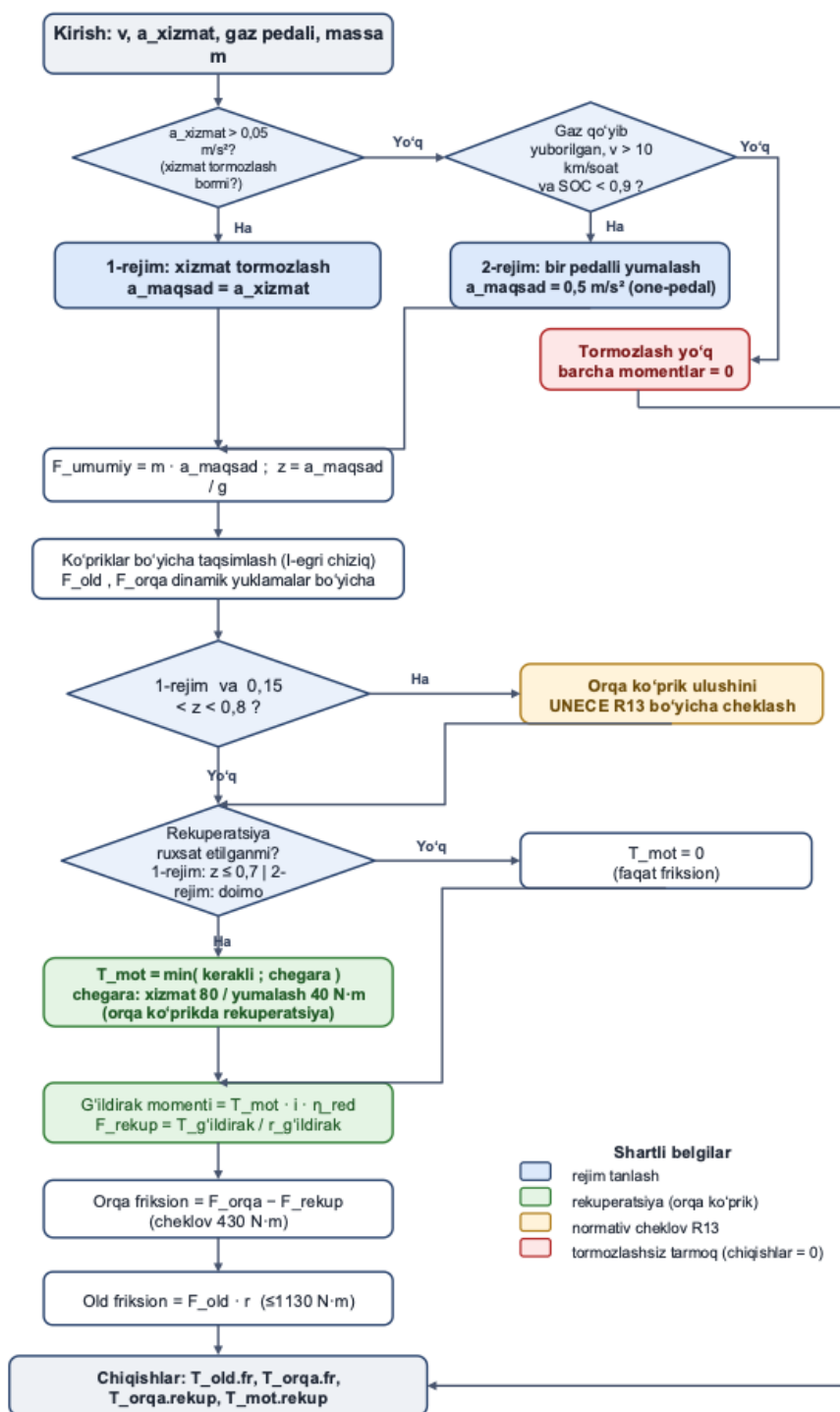
4-rasm – Avtomobil bo‘ylama dinamikasining kuch sxemasi

Rekuperativ tormozlashni boshqarishning parallel strategiyasi haydovchi tormoz pedalini bosgan paytda elektr yuritma va friksion tormoz tizimidan bir vaqtning o‘zida foydalanishni nazarda tutadi. Biroq erkin yumalash rejimida shinalar va yo‘l yuzasi orasidagi ishqalanish kuchi harakatga qarshilik yaratgani sababli tormoz tizimining faqat rekuperativ tashkil etuvchisi faollashadi. Rekuperativ tormozlashni boshqarish algoritmining asosiy tuzilishi 5-rasmda keltirilgan.

Tormozlashning energiya samaradorligini oshirish va tormozlash xavfsizligini saqlash maqsadida 6-rasmda keltirilgan rekuperativ tormozlashni boshqarish algoritmi taklif etilgan. Ushbu algoritm tormoz kuchlarini shunday taqsimlaydiki, oddiy tormozlash holatlarida tormoz kuchi I-egri chizig‘iga muvofiq taqsimlanadi va generator rejimidagi elektr mashinasi orqa ko‘priksida tormoz momentini ta‘minlaydi.



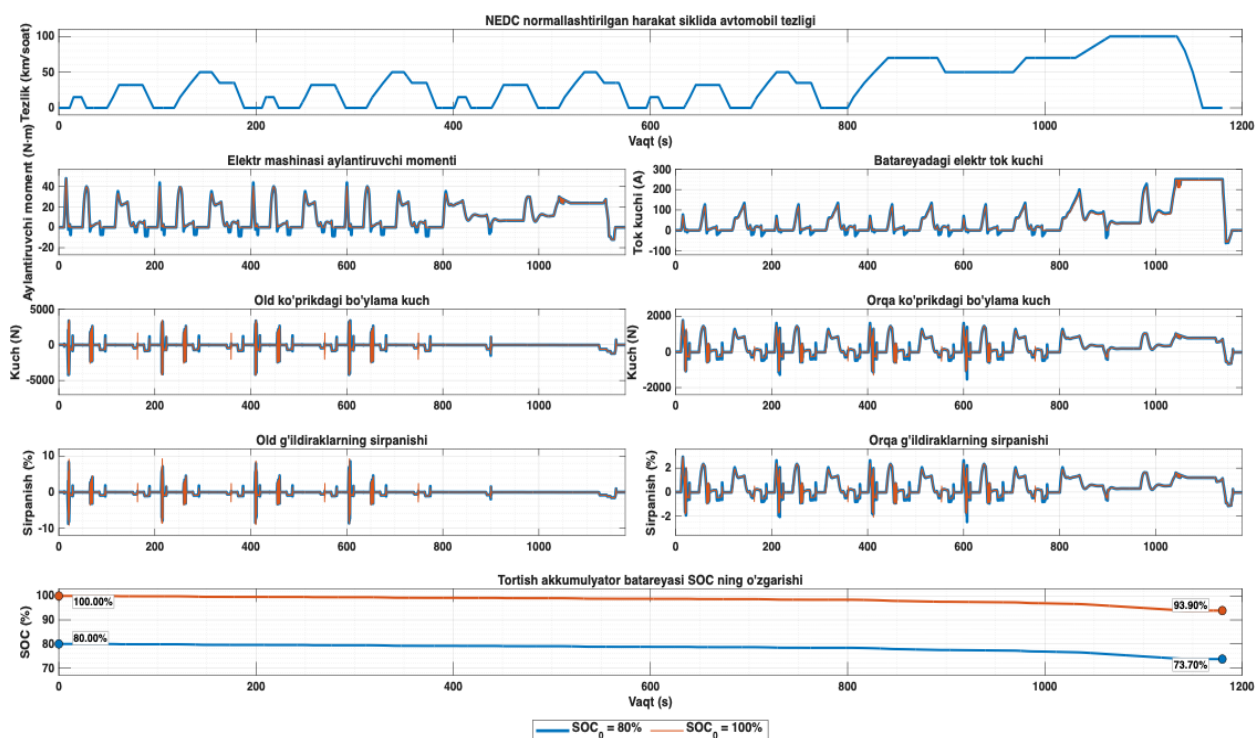
5-rasm – Rekuperativ tormozlashni boshqarishning parallel strategiyasi



6-rasm – Rekuperativ tormozlashni boshqarishning taklif etilayotgan strategiyasi

7-rasmda tortish batareyasining boshlang'ich zaryad darajasi uchun ikki ssenariy ($SOC_0=80\%$ va $SOC_0=100\%$) bo'yicha NEDC harakat siklini bajarishda elektromobil harakati parametrlari va quvvat elektr qurilmasi ishi dinamikasi keltirilgan.

$SOC_0=100\%$ holatida, aksincha, batareyaning zaryadlanish darajasi 95% dan pasaymaguncha rekuperatsiya ishlamaydi. NEDC harakat siklida rekuperatsiya faqat tormozlashning oxirgi qismida (1150–1180-soniyalarda) yoqiladi, bu elektr mashinasi aylantiruvchi momenti va batareyadagi elektr tok kuchi grafiklari bilan tasdiqlanadi.



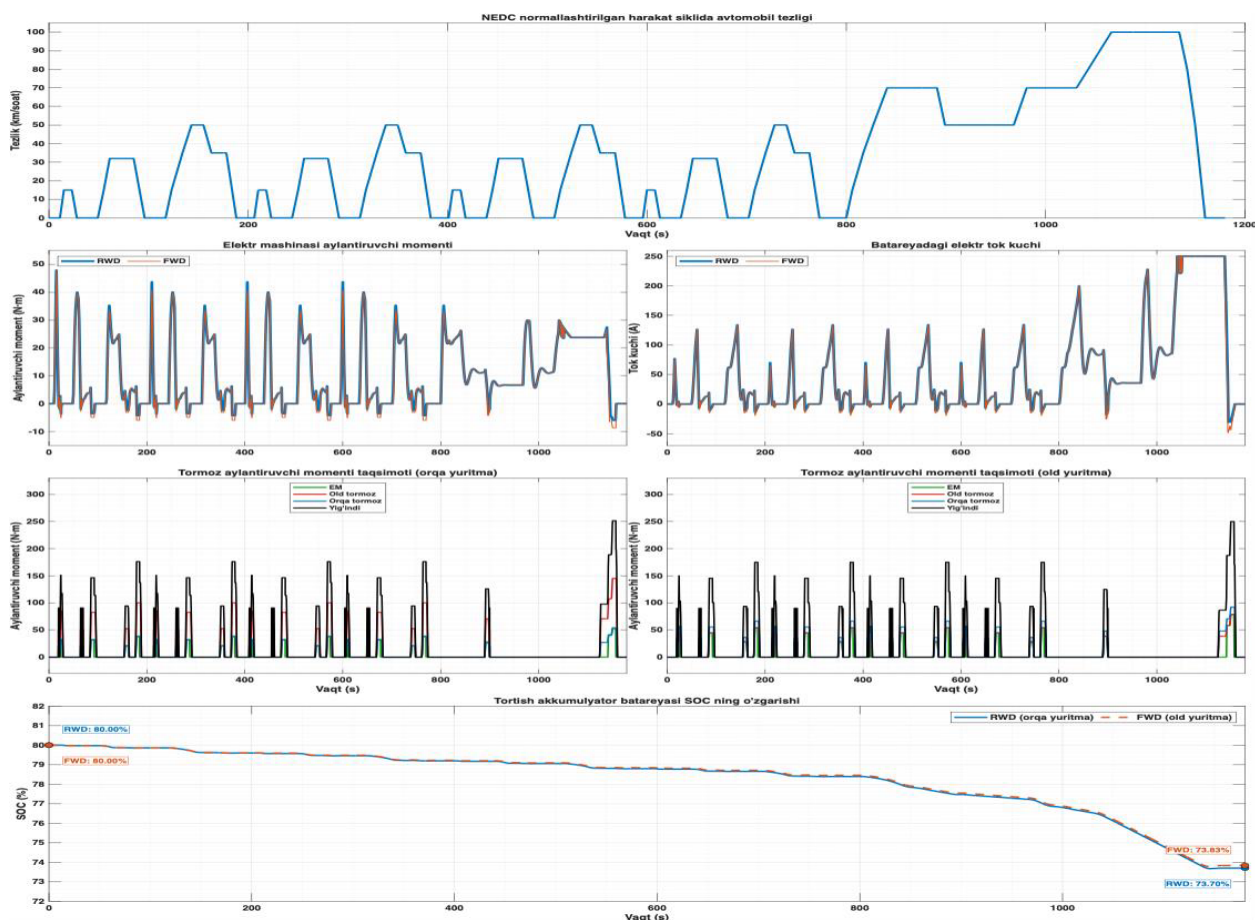
7-rasm – NEDC harakat siklida avtomobil tezligi, elektr mashinasi aylantiruvchi momenti va tortish akkumulyator batareyasidagi elektr tok kuchi, old va orqa ko‘priklardagi bo‘ylama kuch, old va orqa g‘ildiraklarning sirpanishi, shuningdek batareya zaryadlanish darajasining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi grafigi

1-jadval tortish batareyasining boshlang‘ich zaryadlanish darajasining turli harakat sikllarini bajarishdagi energiya tejami ta‘sirini umumlashtiradi. Boshlang‘ich SOC 100% dan 80% gacha pasayganda rekuperativ tormozlash ulushining ortishi kuzatiladi, bu zaryad sarfining kamayishiga va natijada energiya samaradorligining oshishiga olib keladi. Eng katta tejash effekti WLTC siklida erishiladi; buni harakat profilining yanada dinamik tabiati, tormozlash fazalarining ko‘pligi, shuningdek harakat siklining kattaroq uzunligi bilan izohlash mumkin. Shu bilan birga uchala harakat sikli ham bosib o‘tilgan 1 km yo‘lga to‘g‘ri keladigan taxminan bir xil solishtirma elektr energiya tejimini ko‘rsatdi.

1-jadval

Batareyaning boshlang‘ich zaryadlanish darajasining NEDC, WLTC, CLTC harakat sikllarida rekuperativ tormozlashning energiya samaradorligiga ta‘siri

Harakat sikli	Boshlang‘ich zaryadlanish darajasi (%)	Oxirgi zaryadlanish darajasi (%)	Farqi (% SOC)	Energiya tejami (kVt·s)	Harakat sikli uzunligi (km)
NEDC	100	93.90	0.20	0.03	11.02
	80	73.70			
WLTC	100	84.17	0.43	0.06	23.66
	80	63.74			
CLTC	100	92.16	0.28	0.04	14.7
	80	71.88			



8-rasm – NEDC harakat siklida (boshqa barcha parametrlar teng bo‘lganda) old yuritma va orqa yuritma avtomobillarda elektr mashinasi aylantiruvchi momenti, batareyadagi elektr tok kuchi va tormoz aylantiruvchi momenti taqsimoti, shuningdek batareya zaryadlanish darajasining vaqt bo‘yicha bog‘liqliklarini taqqoslash

Batareya zaryadlanish darajasi dinamikasining energiya iste‘moli va rekuperatsiyasi bilan taqqoslanishi 8-rasmda ko‘rsatilgan bo‘lib, bu old yuritma topologiyaning afzalligini tasdiqlaydi. FWD varianti uchun SOC pasayish sur‘ati samarali rekuperativ tormozlash fazalarining ko‘pligi tufayli sezilarli darajada past.

2-jadval shuni ko‘rsatadiki, uchala harakat siklining har birida FWD modelining energiya qaytarish ulushi orqa yuritma variantnikidan yuqori. Masalan, WLTCda rekuperatsiya hajmi 0,036 kVt·s o‘rniga 0,060 kVt·s ni, CLTCda esa 0,025 kVt·s o‘rniga 0,039 kVt·s ni tashkil etadi. NEDCda bu ko‘rsatkich 0,014 kVt·s o‘rniga 0,022 kVt·s ga teng. Elektromobil xatti-harakatini turli harakat sikllarida taqqoslash yuqorida keltirilgan qonuniyatlarning qanchalik barqarorligini ko‘rsatadi.

2-jadval

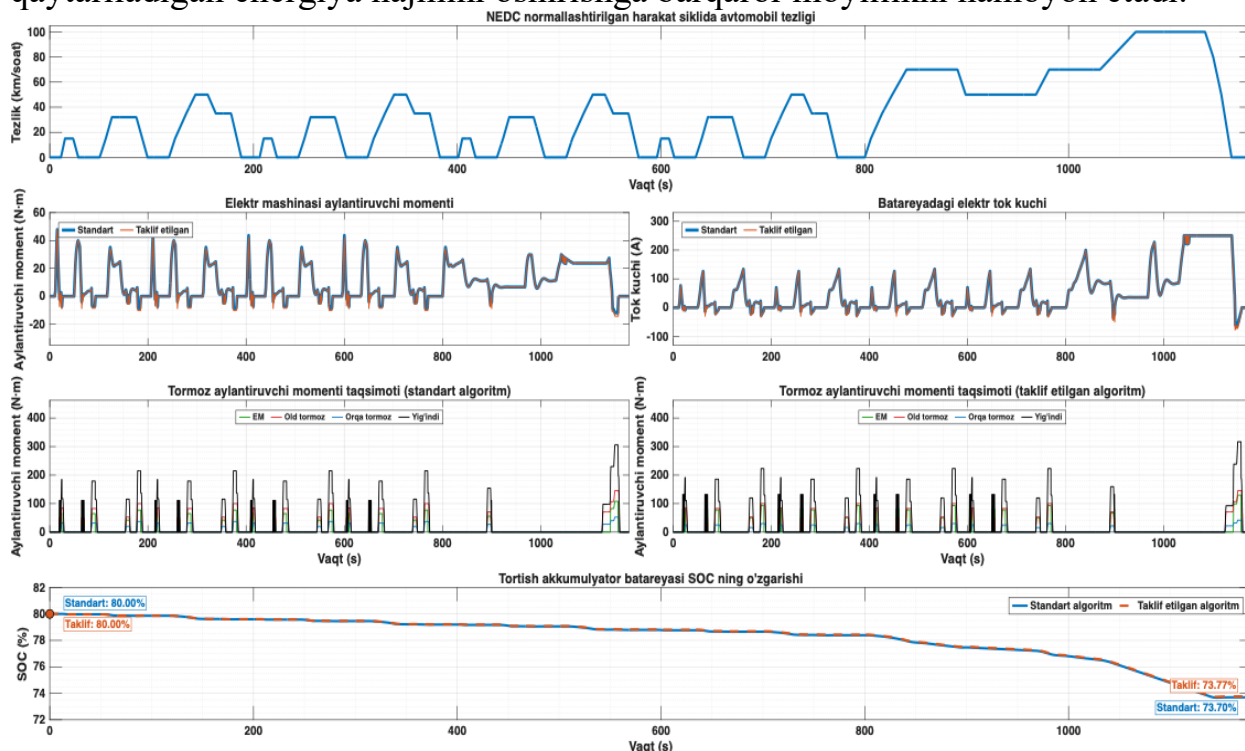
Yuritma topologiyasining (old yuritma/orqa yuritma) NEDC, WLTC, CLTC harakat sikllarida rekuperativ tormozlashning energiya samaradorligiga ta’siri

Harakat sikli	Yuritma	Sarflangan energiya (kVt·s)	Rekuperatsiya energiyasi (kVt·s)	Rekuperatsiya ulushi (%)	Energiya tejami (kVt·s)	Harakat sikli uzunligi (km)
NEDC	RWD	0.83	0.045	5,45	0.028	11.02
	FWD	0.81	0.052	6,43		
WLTC	RWD	2.12	0.12	5,73	0.05	23.66
	FWD	2.09	0.14	6,82		
CLTC	RWD	1.08	0.068	6,35	0.032	14.7
	FWD	1.06	0.080	7,62		

Standart algoritm orqa ko'prikda ilashish pasayishi xavfi tufayli rekuperatsiyani cheklaydigan tormozlash rejimlarida taklif etilayotgan usul tormoz momentining yanada silliq va barqaror profilini ta'minlaydi, bu avtomobil kinetik energiyasining kattaroq hajmini keyinchalik elektr energiyasiga aylantirish uchun jalb qilish imkonini beradi.

Batareya zaryadlanish darajasi, energiya iste'moli va rekuperatsiya hajmining o'zgarish grafiklari (9-rasm) taklif etilayotgan boshqaruv strategiyasining afzalliklarini tasdiqlaydi. Shuni ta'kidlash kerakki, ikkala algoritmdan foydalanilganda ham sekinlashish jarayonida qo'llaniladigan umumiy tormoz momenti o'zgarmaydi, chunki u asosan tezlik profili va avtomobil o'lchamlariga bog'liq. Barcha harakat sikllarida SOC pasayish tezligi kamroq va tormozlashdagi tok manfiy tashkil etuvchisining ko'proq marta ortishi kuzatiladi.

3-jadval har bir harakat sikli uchun energiya sarfi va rekuperatsiya qiymatlarini keltiradi. NEDC sikli uchun taklif etilayotgan algoritm energiya sarfini 0,83 dan 0,82 kVt·s gacha kamaytiradi va rekuperatsiyani 0,045 dan 0,060 kVt·s gacha oshiradi, bu 35% o'sishga to'g'ri keladi. WLTC siklida samaradorlik o'sishi 33% ni tashkil etadi: rekuperatsiya energiyasi hajmi sarfning 2,12 dan 2,11 kVt·s gacha kamayishi bilan bir vaqtda 0,12 dan 0,16 kVt·s gacha ortadi. Ko'proq o'zgaruvchan va past tezlikdagi fazalar soni ko'p bo'lgan CLTCda yangi algoritm energiya sarfini 1,08 dan 1,07 kVt·s gacha kamaytirgan holda rekuperatsiyaning 32% o'sishini (0,068 dan 0,089 kVt·s gacha) beradi. Barcha hollarda taklif etilayotgan usul avtomobilning dinamik xususiyatlarini yomonlashtirmagan holda batareyaga qaytariladigan energiya hajmini oshirishga barqaror moyillikni namoyon etadi.

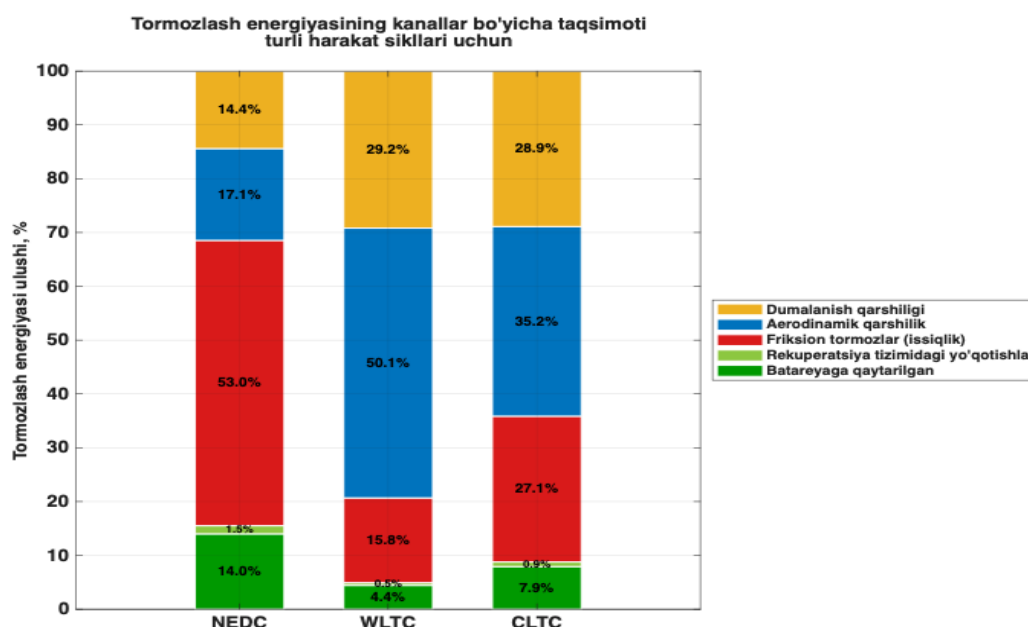


9-rasm – NEDC harakat siklida (boshqa barcha parametrlar teng bo'lganda) orqa yuritmalı elektromobilda standart va taklif etilayotgan rekuperativ tormozlashni boshqarish algoritmlari qo'llanganda elektr mashinasi aylantiruvchi momenti, batareyadagi elektr tok kuchi va tormoz aylantiruvchi momenti taqsimoti, shuningdek batareya zaryadlanish darajasining vaqt bo'yicha bog'liqliklarini taqqoslash

Rekuperativ tormozlashni boshqarish algoritmining NEDC, WLTC, CLTC harakat sikllarida rekuperativ tormozlashning energiya samaradorligiga ta'sirini taqqoslash

Harakat sikli	Algoritm	Sarflangan energiya (kVt·s)	Rekuperatsiya energiyasi (kVt·s)	Rekuperatsiya ulushi (%)	Rekuperatsiya o'sishi (%)	Harakat sikli uzunligi (km)
NEDC	Standart	0.83	0,045	5,45	35%	11.02
	Taklif etilgan	0.82	0.060	7,36		
WLTC	Standart	2.12	0.12	5,73	33%	23.66
	Taklif etilgan	2.11	0.16	7,62		
CLTC	Standart	1.08	0.068	6,35	32%	14.7
	Taklif etilgan	1.07	0.089	8,38		

10-rasmda sekinlashish jarayonining to'liq energetik balansi bajarilgan: avtomobil tormozlashda yo'qotadigan kinetik energiya (aylanuvchi massalar koeffitsiyenti δ ni hisobga olgan holda) kanallar o'rtasida – tortish batareyasiga qaytarish, rekuperatsiya tizimidagi yo'qotishlar (elektr zanjiri va transmissiya), friksion tormozlar, shuningdek qaytmaydigan aerodinamik qarshilik va dumalanish qarshiligi o'rtasida taqsimlangan. NEDC, WLTC, CLTC harakat sikllari.

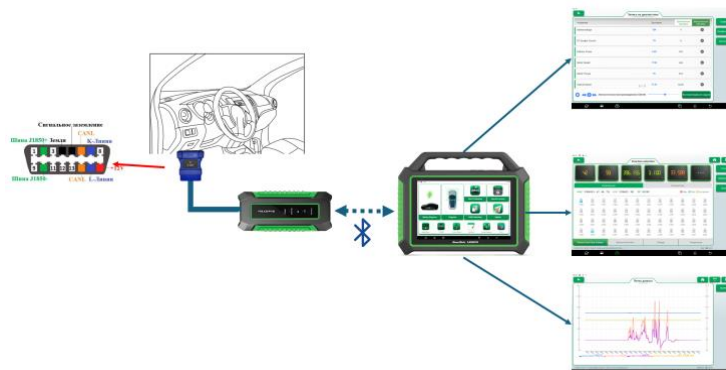


10-rasm – NEDC, WLTC va CLTC harakat sikllarida tormozlash to'liq energiyasining taqsimoti

«Yengil elektr yuritmalı avtomobilning rekuperativ tormozlanishini amaliy tadqiq etish» deb nomlangan uchinchi bobda elektr yuritmalı yengil avtomobilning yo'l va poligon sinovlari, shuningdek rekuperativ tormozlash parametrlarini qayd etish va olingan eksperimental ma'lumotlar ishonchliligini baholash uchun foydalanilgan o'lchov uskunaları tarkibi va imkoniyatlari tavsiflangan.

Quvvat qurilmasi va tortish akkumulyator batareyasi parametrlarini qayd etish uchun SmartSafe P01 intellektual diagnostika tizimi qo'llanilgan; u elektr va gibrid transport vositalarini diagnostika qilish uchun mo'ljallangan, chiqarilgan interfeys moduliga ega planshet kompyuterga asoslangan ixtisoslashgan majmuadir.

11-rasmda avtomobil parametrlarini real vaqtda diagnostika qilish va monitoring qilish uchun apparat-dasturiy majmuaning strukturaviy sxemasi keltirilgan. Ma'lumotlar manbai standart OBD-II diagnostika interfeysi orqali ulangan avtomobilning elektron boshqaruv tizimidir (EBB). Bort tarmog'idan signallar diagnostika adapteriga uzatiladi; adapter ma'lumotlarni o'qish, dastlabki qayta ishlash va Bluetooth protokoli bo'yicha simsiz uzatish funksiyalarini bajaradi.



11-rasm – Avtomobil diagnostika ma'lumotlarini yig'ish va vizuallashtirish tizimi arxitekturası

Poligon sinovlarini o'tkazish tartibi quyidagi bosqichlarni o'z ichiga olgan:

1. Avtomobilni ishga tushirish. Uskunalar soz holatini tekshirish. Tayyor bo'lganda harakat boshlanishigacha 5 soniya teskari sanoq.

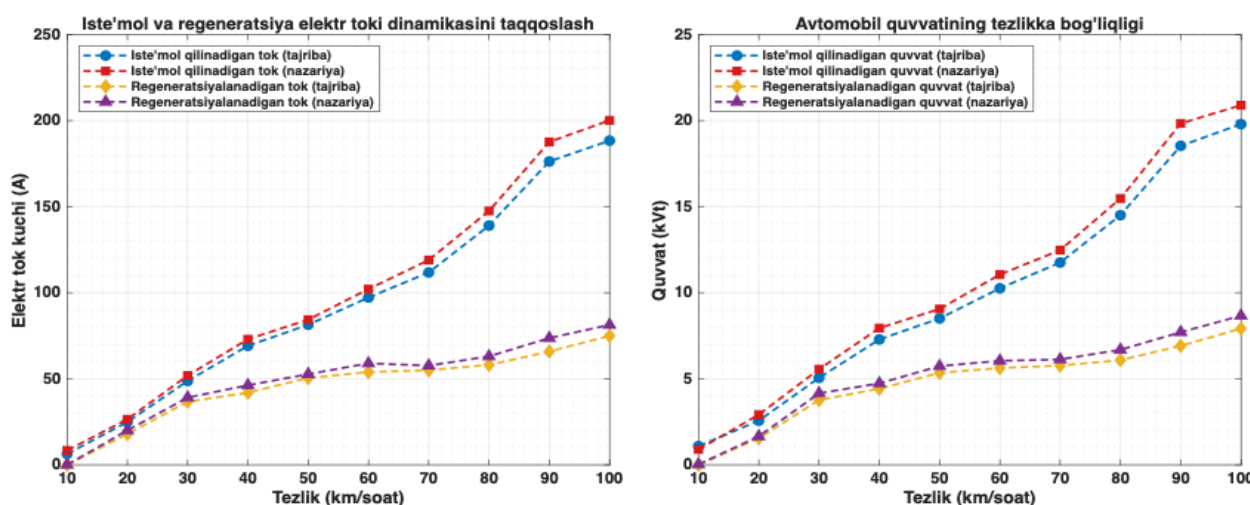
2. Avtomobilni belgilangan tezlikkacha tezlatish (min. tezlik = 20 km/soat, tezlik ortish qadami = 10 km/soat).

3. Avtomobil asboblar panelidagi elektr tok kuchi ko'rsatkichlarini barqarorlashtirish uchun tezlikni 8–15 soniya davomida ushlab turish.

4. Akselerator pedalini qo'yib yuborish va to'liq to'xtaguncha erkin yumalashda harakatlanish. Akselerator pedali qo'yib yuborilgunga qadar va erkin yumalash boshida tok kuchi qiymatlarini qayd etish. Sinov o'tkazishning boshlang'ich holatiga qaytish.

5. 2–4-bosqichlarni 29 marta takrorlash.

6. Tezlik ortish qadamidan foydalanib, yangi belgilangan tezlikni o'rnatish. 2–5-bosqichlarni takrorlash.



12-rasm – Elektromobil elektr toki va quvvatining harakat tezligiga bog'liqligi bo'yicha poligon eksperimental tadqiqotlari va nazariy qiymatlarni taqqoslash

12-rasmda elektromobil elektr toki va quvvatining harakat tezligiga bog'liq holdagi poligon eksperimental ma'lumotlari nazariy qiymatlar bilan taqqoslangan (chapda – iste'mol qilinadigan va regeneratsiyalanadigan tok, o'ngda – mos quvvat). Imitatsion modelning aniqligi MAE, RMSE, MAPE va NRMSE ko'rsatkichlari bo'yicha baholangan.

Tok bo'yicha umumlashtirilgan ko'rsatkichlar (4-jadval) iste'mol qilinadigan tok uchun MAE = 4,4 A va RMSE = 5,21 A ni, regeneratsiyalanadigan tok uchun esa sezilarli darajada kichik qiymatlarni (2,00 A va 2,39 A) ko'rsatdi, bu modelning rekuperatsiya rejimida yaxshiroq mosligidan dalolat beradi; ikkala egri chiziq uchun MAPE taxminan 4,55% ni tashkil etdi. Tezlik rejimlari bo'yicha batafsil tahlil (5-jadval) xatoliklarning tizimli xususiyatga ega ekanini va tezlik ortishi bilan monoton o'sishini aniqladi: iste'mol qilinadigan tok bo'yicha tafovut 20 km/soatda 2 A dan 100 km/soatda 11 A gacha ortadi. Quvvat bo'yicha umumlashtirilgan ko'rsatkichlar (6-jadval) MAE = 1,07 kVt, RMSE = 1,18 kVt ni tashkil etdi, MAPE esa 9% dan oshmadi. Quvvat bo'yicha batafsil tafovutlar (7-jadval) 20–60 km/soat oralig'ida 1,5 kVt dan oshmaydi, 70 km/soatdan yuqori tezliklarda esa 1,5–2,0 kVt gacha ortadi, bu tok uchun kuzatilgan manzaraga mos keladi. Olingan natijalar matematik modelning ko'rib chiqilayotgan ish rejimlari oralig'idagi adekvatligini tasdiqlaydi.

4-jadval

Iste'mol qilinadigan va regeneratsiyalanadigan elektr tokini taqqoslashda imitatsion model sifatining umumlashtirilgan ko'rsatkichlari

Parametr	MAE, A	RMSE, A	MAPE, %
Iste'mol qilinadigan tok	6.22	6.86	5.72
Regeneratsiyalanadigan tok	2.89	3.13	6.90
Jami	4.56	5.33	6.31

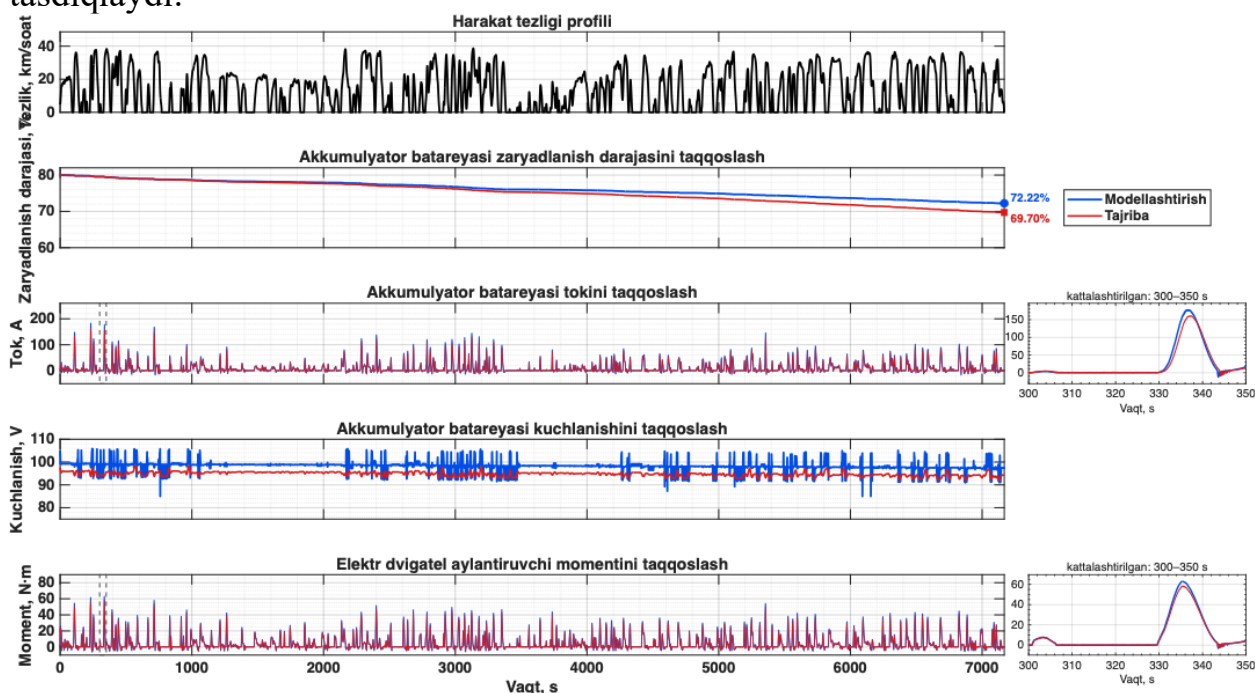
5-jadval

Elektr tokining hisob va eksperimental qiymatlari tezlik rejimlari bo'yicha batafsil tafovutlari

v, km/soat	Iste'm. eksp., A	Iste'm. imit., A	Δ iste'm., A	Regen. eksp., A	Regen. imit., A	Δ regen., A	MAPE, %
20	28	26	2.0	12	11	1.0	7.7%
30	42	39	3.0	18	16	2.0	9.1%
40	60	56	4.0	25	23	2.0	7.3%
50	82	77	5.0	33	31	2.0	6.1%
60	108	102	6.0	43	40	3.0	6.3%
70	138	131	7.0	54	51	3.0	5.3%
80	172	164	8.0	67	63	4.0	5.3%
90	210	200	10.0	81	77	4.0	4.9%
100	252	241	11.0	97	92	5.0	4.8%

Imitatsion modelning shunga o'xshash sharoitlardagi ishchanligini tekshirish uchun verifikatsiyaning ikkinchi bosqichi – kunning turli vaqtida o'tkazilgan shahar yurishlari natijalari bo'yicha – bajarildi. Ko'rib chiqilayotgan davrlarning har birida – ertalabki va kunduzgi vaqtda – 30 tadan yurish o'tkazildi, bu sharoitlarning takrorlanuvchanligini va statistik qayta ishlash uchun yetarli hajmdagi ma'lumotlarni ta'minladi.

13-rasmda misol sifatida kunduzgi vaqtda bajarilgan yurishlardan biri keltirilgan. Sikl bir xil tezlik oralig‘i saqlangan holda kamroq davomiylik (taxminan 4000 s) bilan ajralib turadi, bu kun davomidagi transport oqimining boshqacha sharoitlarini aks ettiradi. Moslikning sifat manzarasi saqlanadi: tok, kuchlanish va aylantiruvchi momentning hisob va eksperimental bog‘liqliklari yurishning butun davomida yaqin, sikl oxiriga kelib zaryadlanish darajasi model bo‘yicha 64,46% ni, eksperiment bo‘yicha 62,21% ni tashkil etadi (tafovut taxminan 2,25 foiz punkti). Kunning turli vaqtda bajarilgan mustaqil yurishlar uchun zaryadlanish darajasi nisbiy tafovutining yaqinligi ishlab chiqilgan modelning harakat rejimi o‘zgarishiga barqarorligidan dalolat beradi va uning keng ish sharoitlari oralig‘idagi adekvatligini tasdiqlaydi.



13-rasm – Shahar harakat siklida (kunduzgi vaqt) elektromobil parametrlarining hisob va eksperimental qiymatlarini taqqoslash

6-jadvalga ko‘ra, aniqlikning nisbiy ko‘rsatkichlari ertalabki qiymatlarga yaqin (kuchlanish bo‘yicha MAPE 3,64%, zaryadlanish darajasi bo‘yicha MAPE 1,27%, moment bo‘yicha NRMSE 2,16%), tok bo‘yicha biroz kattaroq absolyut xatolar (MAE = 7,28 A, RMSE = 13,04 A) esa kunduzgi transport oqimining yanada dinamik tabiati va yuqori tok cho‘qqilari bilan mos keladi. Variatsiya koeffitsiyenti o‘sha oraliqda (taxminan 10–19%) qoladi, bu kunning vaqtdan qat‘i nazar natijalarning solishtirma takrorlanuvchanligidan dalolat beradi.

6-jadval

Imitatsion model verifikatsiyasi xatosining kunduzgi vaqtdagi 30 ta yurish seriyasi bo‘yicha statistik ko‘rsatkichlari

O‘rganilayotgan parametr	Ko‘rsatkich	O‘rtacha	σ	CV, %	O‘rtachaning 95% IO
Batareya toki	MAE, A	7,28	1,07	14,7	6,88-7,68
	RMSE, A	13,04	1,71	13,1	12,40-13,68
	NRMSE, %	5,02	0,67	13,3	4,77-5,27
Kuchlanish	MAE, V	3,58	0,38	10,6	3,44-3,72
	RMSE, V	3,77	0,43	11,4	3,61-3,93

	MAPE, %	3,64	0,45	12,4	3,47-3,81
Aylantiruvchi moment	MAE, N·m	1,02	0,19	18,6	0,95-1,09
	RMSE, N·m	1,66	0,27	16,3	1,56-1,76
	NRMSE, %	2,16	0,23	10,6	2,07-2,25
	MAE, %	0,91	0,17	18,7	0,85-0,97
Zaryadlanish darajasi	RMSE, %	1,18	0,19	16,1	1,11-1,25
	MAPE, %	1,27	0,20	15,7	1,20-1,34

7-jadvalda ertalabki va kunduzgi yurishlar uchun real shahar sharoitlarida iste'mol qilingan va rekuperatsiya qilingan energiyani eksperimental baholash natijalari keltirilgan. Energiyalar tortish batareyasi quvvatini qayd etilgan tok va kuchlanish signallari bo'yicha integrallash yo'li bilan olingan: iste'mol qilingan energiya ertalabki yurishda 2,20 kVt·s ni, kunduzgi yurishda 2,10 kVt·s ni, rekuperatsiya qilingani esa mos ravishda 0,128 va 0,132 kVt·s ni tashkil etdi, bu sarflangan energiyaning 5,82% va 6,28% ulushdagi rekuperatsiyasiga to'g'ri keladi. Uzunligi taqqoslanadigan bitta marshrut bo'yicha ikkita mustaqil yurish ko'rsatkichlarining yaqinligi (27,81 va 26,64 km) natijalarning takrorlanuvchanligidan dalolat beradi. Olingan rekuperatsiya ulushi qiymatlari WLTC sikli uchun hisoblangan qiymat (7,62%) bilan mos keladi va ishlab chiqilgan imitatsion modelning real shahar ekspluatatsiyasi sharoitlaridagi adekvatligini tasdiqlaydi.

7-jadval

Shahar ekspluatatsiyasi sharoitlarida iste'mol qilingan va rekuperatsiya qilingan energiyani eksperimental baholash natijalari

Yurish davri	Iste'mol qilingan energiya, kVt·s	Rekuperatsiya qilingan energiya, kVt·s	Rekuperatsiya ulushi, %	Masofa, km	Solishtirma rekuperatsiya, kVt·s/km
Ertalabki yurish	2.20	0,128	5,82	27.81	0,0463
Kunduzgi yurish	2,1	0,132	6,28	26,64	0,0495

«Rekuperativ tormozlashdan iqtisodiy va ekologik samarani hisoblash» deb nomlangan to'rtinchi bobda tormozlash jarayonida kinetik energiyaning bir qismini elektromobil batareyasiga qisman qaytarish hisobiga elektr energiyasini tejash hisob-kitoblari keltirilgan. Shundan so'ng, atmosferaga chiqarib tashlanishning oldini olish hisob-kitoblari keltirilgan.

Solishtirma rekuperatsiya energiyasi e harakat sikli davomida qaytarilgan energiya W ning bosib o'tilgan yo'l L ga nisbati sifatida aniqlanadi, ya'ni

$$e = \frac{W}{L} \quad (15)$$

Imitatsion tadqiqotlar natijalariga ko'ra, real ekspluatatsiya sharoitlariga eng yaqin bo'lgan WLTC shahar harakat siklida taklif etilayotgan rekuperativ tormozlashni boshqarish algoritmi standart algoritmdagi 0,00507 kVt·s/km ga qarshi 0,00676 kVt·s/km solishtirma energiya qaytarishni ta'minlaydi.

Yillik rekuperatsiya energiyasi quyidagicha hisoblanadi

$$W_{yil} = e \cdot L_{yil} \quad (16)$$

bu yerda L_{yil} – o'rtacha yillik yugurish. O'rtacha statistik ekspluatatsiya uchun xos bo'lgan $L_{yil} = 20\,000$ km o'rtacha yillik yugurishda yillik rekuperatsiya energiyasi

hajmi standart algoritmda taxminan 101,4 kVt·s ni, taklif etilayotganida esa taxminan 135,3 kVt·s ni tashkil etadi. Shunday qilib, taklif etilayotgan algoritm bitta avtomobilga yiliga qo'shimcha $\Delta W \approx 33,8$ kVt·s qaytaradi, bu WLTC siklida rekuperatsiya energiyasi hajmining 33% ga va NEDC siklida 35% gacha o'sishiga to'g'ri keladi.

$$S = W_{yil} \cdot N_{el} \quad (17)$$

bu yerda N_{el} – elektr energiyasi tarifi. Tarif = 900 so'm/kVt·s bo'lganda taklif etilayotgan algoritm bilan rekuperatsiya hisobiga tejam bitta avtomobilga yiliga taxminan 121 700 so'mni tashkil etadi; shundan taxminan 30 400 so'm bevosita standart algoritmgaga nisbatan taklif etilayotgan algoritmni qo'llash hisobiga ta'minlanadi.

Shuni ta'kidlash kerakki, kichik sinf elektromobillari taksi haydovchilari va yetkazib berish sohasi xodimlari orasida alohida ommabopdir; ularning kunlik yugurishi 150–300 km gacha yetishi mumkin, bu odatiy shaxsiy ekspluatatsiyadagi yugurishdan ancha yuqori. Rekuperatsiya energiyasi hajmi yugurishga to'g'ri proporsional bo'lgani sababli, bu toifadagi foydalanuvchilar uchun iqtisodiy samara bir necha barobar ortadi. 8-jadvalga ko'ra, yillik yugurishi taxminan 45 000–90 000 km (300 ish kunida kuniga 150–300 km atrofida) bo'lgan jadal ekspluatatsiyada taklif etilayotgan algoritm bilan yillik rekuperatsiya energiyasi hajmi taxminan 304–609 kVt·s ni tashkil etadi, bu bitta avtomobilga yiliga taxminan 274 000–548 000 so'm tejamga to'g'ri keladi; bunda taklif etilayotgan algoritmning standart algoritmgaga nisbatan bevosita hissasi yiliga taxminan 68 500–137 000 so'mni tashkil etadi.

8-jadval

Tadqiqot natijalarining ekspluatatsiya jarayonidagi texnik-iqtisodiy asoslanishi

Ekspluatatsiya rejimi (yugurish)	Jami rekuperatsiya, kVt·s/yil	Jami tejam, so'm/yil	Algoritm hissasi, kVt·s/yil	Algoritm hissasi, so'm/yil
Shaxsiy ekspluatatsiya (20 000 km/yil)	135	121 700	34	30 400
Taksi/yetkazib berish, 150 km/kun (≈ 45 000 km/yil)	304	273 900	76	68 500
Taksi/yetkazib berish, 300 km/kun (≈ 90 000 km/yil)	609	547 800	152	137 000

Rekuperatsiyaning ekologik ta'siri iqtisodiy asosda hisoblanadi, shuning uchun batareyaga qaytarilgan energiyani elektr stansiyasida ishlab chiqarish shart emas. O'zbekiston energetika tizimida issiqlik generatsiyasi ustunlik qiladi. Elektr energiyasining qariyb 78 foizini tabiiy gaz, 7 foizini ko'mir beradi². Tarmoq energiyasi iste'molining kamayishi bevosita issiqxona gazlari chiqindilarini kamaytiradi.

Oldini olingan karbonat angidrid chiqindilarining yillik massasi oldingi paragrafda keltirilgan rekuperatsiyalangan energiyaning yillik hajmi bo'yicha hisoblanadi:

$$M_{CO_2} = \frac{W_{yil} k_{CO_2}}{\eta_z}$$

² 2023-yil holatiga ko'ra. Manba: <https://lowcarbonpower.org/region/Uzbekistan>

bu yerda k_{CO_2} - bir kilovatt-soat elektr energiyasiga to'g'ri keladigan uglerod dioksidi solishtirma chiqindilari, η_z - tortuv batareyasini tarmoqdan zaryadlash samaradorligi.

BMTning toza rivojlanish mexanizmi metodologiyasi asosida O'zbekiston energetika tizimi uchun tarmoq emissiya koeffitsiyenti 0,499 tonna CO₂/MVt/soat³ darajasida hisoblab chiqildi. Yoqilg'ini qazib olish va tashishni hisobga olgan holda to'liq hayotiy sikl bo'yicha baholash 1,0 kg CO₂ ekv/kVt/soatni tashkil etadi⁴. Hisoblashda konservativ qiymat $k(CO_2) = 0,50$ kg CO₂/kVt/soat qabul qilingan.

Yillik o'rtacha 20 000 km masofada taklif etilgan algoritm yiliga 135,3 kVt/soatni qaytaradi - zaryadlash samaradorligini hisobga olgan holda, bu yiliga taxminan 150 kVt/soat tarmoq elektr energiyasi va har bir avtomobil uchun taxminan 75 kg CO₂ chiqindilarining oldini oladi. Shundan taxminan 19 kg CO₂ bevosita taklif etilgan algoritm hissasiga to'g'ri keladi. To'liq hayot sikli ikkala bahoni ham ikki baravar oshiradi - mos ravishda 150 va 38 kg CO₂ ekvivalenti.

Taksi va yetkazib berish xizmatlariga xos bo'lgan 45 000 - 90 000 km yillik masofada, taklif etilgan algoritm bilan tiklanish yiliga 304-609 kVt/soatga yetadi, bu 338-677 kVt/soat tarmoq energiyasiga va har bir avtomobilga 169-338 kg CO₂ chiqindilarining oldini olishga mos keladi; algoritmnining bevosita hissasi - 42-85 kg CO₂. Yig'ma natijalar 9-jadvalda keltirilgan.

9-Jadval

Taklif etilgan boshqaruv algoritmi bilan rekuperativ tormozlanishning ekologik samarasi

Ko'rsatkich	Shaxsiy foydalanish (20 000 km/yil)	Tijorat maqsadida foydalanish (45 000–90 000 km/yil)
Yillik rekuperatsiya energiyasi, kVt·soat	135,3	304–609
Ekvivalent tarmoq energiyasi ($\eta_z = 0,9$), kVt·soat	150	338–677
Oldi olingan CO ₂ chiqindilari, kg/yil	75	169–338
Shu jumladan, taklif etilgan algoritm hissasi, kg/yil	19	42–85
Hayot sikli bo'yicha baholash, kg/yil	150	338–677

XULOSA

«Elektr yuritmalı yengil avtomobillarda rekuperativ tormozlash samaradorligini asoslash» mavzusida texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun bajarilgan dissertatsiya tadqiqoti natijasida quyidagi xulosalar qilindi:

1. Masalaning zamonaviy holati tahlili asosida rekuperativ tormozlash strategiyalari (parallel va ketma-ket) hamda boshqaruv algoritmlari (PID-regulyatorlar, chiziqli va adaptiv, noaniq mantiq va mashinali o'qitishga asoslangan, ABS/ESC

³ https://cdm.unfccc.int/methodologies/standard_base/uzbekistan.pdf

⁴ <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>

tizimlari bilan integratsiyalashgan) tasniflangan va ularning kichik sinf elektromobillariga qo'llanilishi baholangan. Arzon orqa yuritmalı yengil elektromobillar uchun rekuperativ tormozlashni asoslash masalalari yetarlicha o'rganilmagani aniqlangan va elektromobillar uchun tormoz kuchlarining optimallashtirilgan taqsimoti bilan parallel strategiya maqbul ekani ko'rsatilgan.

2. Elektr mashinali elektromobilning bo'ylama dinamikasi matematik modelidan foydalanilgan; uning asosida NEDC, WLTC va CLTC normalashtirilgan harakat sikllarida energiya sarfi va qaytarilishi hisoblangan. Taklif etilayotgan algoritmni qo'llaganda energiya sarfi 0,82 kVt·s (NEDC, 11,02 km), 2,11 kVt·s (WLTC, 23,66 km) va 1,07 kVt·s (CLTC, 14,7 km) ni, rekuperatsiya qilingan energiya hajmi esa mos ravishda 0,060, 0,16 va 0,089 kVt·s ni tashkil etdi, bu sarflangan energiyaning 7,36%, 7,62% va 8,38% rekuperatsiya ulushiga to'g'ri keladi.

3. MATLAB/Simulink muhitida yengil elektromobil bo'ylama harakatining old yuritmalı va orqa yuritmalı kompozitsiyalari uchun imitatsion modeli yaratilgan. Old yuritmalı kompozitsiya orqa yuritmalıga qaraganda ko'proq rekuperatsiya hajmini ta'minlashi aniqlangan (qaytariladigan energiya ulushi WLTC siklida – 6,82% ga qarshi 5,73%, CLTCda – 7,62% ga qarshi 6,35%). Tormoz kuchlarini friksion va rekuperativ tizimlar o'rtasida qayta taqsimlashga asoslangan ishlab chiqilgan rekuperativ tormozlashni boshqarish algoritmi rekuperatsiya energiyasi hajmini standartga nisbatan 32–35% ga oshiradi (NEDCda 35%, WLTCda 33% va CLTCda 32%), CLTC siklida qaytariladigan energiya ulushini 8,38% gacha ko'taradi.

4. Rekuperatsiya energiyasi hajmiga ta'sir etuvchi asosiy o'zgaruvchilar aniqlangan va darajalangan: harakat siklining tabiati, yuritma topologiyasi, batareyaning boshlang'ich zaryadlanish darajasi, elektr mashinasi va inverter FIKi, batareyaning qabul qilish qobiliyati va BMS dasturiy ta'minoti, ko'priklar bo'yicha yuklamalar taqsimoti va ilashish, tormoz blending algoritmi. Boshlang'ich zaryadlanish darajasi muhim omil ekani aniqlangan: 100% ga yaqin darajada rekuperatsiya batareya boshqaruv tizimi tomonidan SOC 95% dan pasaymaguncha bloklanadi, shu sababli batareyani 95% dan yuqori zaryadlamaslik tavsiya etiladi.

5. Rekuperativ tormozlash tizimi yoqilgan va o'chirilgan holatdagi eksperimental tadqiqotlar (belgilangan tezliklardagi poligon sinovlari va ertalabki hamda kunduzgi vaqtda 30 tadan shahar yurishlari seriyasi) bilan ishlab chiqilgan modelning ishonchliligi tasdiqlangan: poligonda tok bo'yicha o'rtacha absolyut foiz xatosi 4,55% dan oshmadi, shahar sikllarida tok bo'yicha normalashtirilgan o'rtacha kvadratik xato 4,79–5,02% ni, kuchlanish bo'yicha MAPE 3,53–3,64% ni, zaryadlanish darajasi bo'yicha 1,26–1,27% ni tashkil etdi, variatsiya koeffitsiyenti 10–19% va ishonch oraliqlari tor (Styudent t-mezoni, ishonch ehtimoli 0,95). Shaharda energiyaning haqiqiy qiymatlari eksperimental o'lchangan (3.9-jadval): 2,20 va 2,10 kVt·s sarfda 0,128 va 0,132 kVt·s rekuperatsiya qilindi, bu 5,82% va 6,28% rekuperatsiya ulushiga to'g'ri keladi va WLTC sikli uchun hisoblangan ulush bilan mos keladi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
PhD.03/2026.10.04.T.46.02 ПРИ ТУРИНСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ В ГОРОДЕ ТАШКЕНТЕ**

**ТУРИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ В ГОРОДЕ
ТАШКЕНТЕ**

АСАНОВ СЕЙРАН ЭНВЕРОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО
ТОРМОЖЕНИЯ В ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЯХ С
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ**

05.08.06 – Колесные и гусеничные машины и их эксплуатация

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент–2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2023.4.PhD/T4296.

Диссертация выполнена в Туринском политехническом университете в городе Ташкенте. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.turin.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» («www.ziynet.uz»).

Научный руководитель: Иноятходжаев Жамшид Шухратуллаевич
доктор технических наук, профессор

Rasmiy opponentlar Алимухамедов Шавкат Пирмузамедович
Доктор технических наук, профессор

Мирзалиев Санжар Махаматжон угли
Доктор философии по техническим наукам,
доцент

Yetakchi tashkilot: Ташкентский государственный технический
университет имени И.А. Каримова

Защита диссертации состоится «02» 11 2026 года в 16⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/2026.10.04.T.46.02 при Туринском политехническом университете в городе Ташкенте (Адрес: 100095, г. Ташкент, Малая кольцевая улица, 17. Тел.: (99871) 203-07-77, e-mail: info@polto.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Туринского политехнического университета в городе Ташкенте (зарегистрирована под номером 125). (Адрес: 100095, г. Ташкент, Малая кольцевая улица, 17. Тел.: (99871) 203-07-77, e-mail: info@polto.uz).

Автореферат диссертации разослан «20» 10 2026 года.
(реестр Протокола рассылки № 1 от «02» 09 2026 года).



О.А.Туйчиев
Председатель Научного совета по
присуждению учёных степеней, д.т.н., доцент

Ж.Ж.Каримов
Ученый секретарь Научного совета по
присуждению учёных степеней, д.ф.ф.-м.н., доцент

С.К.Рузимов
Председатель Научного семинара при Научном
совете по присуждению учёных степеней,
д.т.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и значимость темы диссертации. Автопроизводители во всем мире уделяют большое внимание разработке и производству более экологически чистого транспорта для уменьшения ущерба, наносимого окружающей среде. Сегодня одним из ключевых факторов развития автомобилестроения является внедрение технологий, которые обеспечивают рациональное использование энергии и охрану окружающей среды при использовании автомобилей с электродвигателями. В этой связи одной из наиболее эффективных систем, направленных на повышение уровня энергосбережения, является система рекуперации в гибридных электромобилях и электрокарах. По этой причине, одной из наиболее эффективных систем, направленных на повышение уровня энергосбережения, является система рекуперации в гибридных электромобилях и электрокарах. Данное исследование имеет актуальность, так как оно помогает исследовать и частично решать проблему, используя теорию рекуперативного торможения (РТ) в транспортных средствах, которые оснащены электрическим приводом. Использование данной технологии позволяет вернуть до 25% истраченной электрической энергии в тяговую аккумуляторную батарею электрифицированного транспортного средства.

В мире на данный момент крупнейшие автопроизводители прикладывают огромные усилия и уделяют пристальное внимание исследованиям, акцентированным на нахождение решений для уменьшения количества вредных выхлопных газов, а также улучшение топливной экономичности путем разработки алгоритмов для распределения тормозного усилия между классической гидравлической тормозной системой и рекуперативной системой электрического привода автомобиля. Особое значение на мировом рынке автотранспортных средств занимают электромобили и гибридные электромобили, способные заряжать свои тяговые аккумуляторные батареи в процессе торможения за счёт преобразования части кинетической энергии автомобиля в электрическую энергию.

В нашей Республике отдельное внимание уделяется следованию требований энергоэффективности при использовании сырьевых природных ресурсов. С целью поэтапного внедрения вышеуказанных требований была разработана Стратегия действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2022–2026 годы¹, в которой подчеркивается острая необходимость в повсеместном внедрении энергосберегающих технологий в производстве и снижении потребления энергии и ресурсов в экономике. В этой связи в сфере разработки и производстве транспортных средств с электрическим приводом предопределяется необходимость изучения

¹ Указ Прехидента Республики Узбекистан №УП-60 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики» от 28.01.2022 (www.lex.uz)

энергосберегающих технологий, внедряемых в современных электрифицированных транспортных средств. В частности, алгоритмы по улучшению рекуперативного торможения требуют должного внимания, принимая во внимание их влияние на топливную экономичность автомобиля и безопасность в процессе торможения.

В определенной степени эта диссертационная работа помогает выполнить задачи, поставленные государством в Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП-443 от 19 декабря 2022 года “О мерах о государственной поддержке организации производства электромобилей”, №ПП-444 от 19 декабря 2022 года “О мерах по расширению инфраструктуры эксплуатации электромобилей”, №ПП-436 от 02 декабря 2022 года “О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан на “Зеленую” экономику до 2030 года”, №ПП-4477 от 04 октября 2019 года “Об утверждении стратегии по переходу Республики Узбекистан на “Зелёную” экономику в период 2019 - 2030 годов”, № ПП-4230 от 6 марта 2019 г. “О мерах по кардинальному совершенствованию грузовых и пассажирских перевозок”, №ПП-3589 от 6 марта 2018 г. “О мерах по дальнейшему совершенствованию системы управления автомобильным транспортом”, а также в ряде других нормативно-правовых документах касательно данной деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии со III приоритетным направлением развития науки и технологий республики «Энергетика, энергоресурсоэффективность, транспорт, машины и оборудование».

Степень изученности проблемы. Ряд передовых научных центров, лабораторий и научно-исследовательских университетов по всему миру проводят теоретические и практические исследования мехатронных систем электромобилей и их применения. Такие зарубежные ученые, как G.Genta, S.Onori, L.Serrao, A.Tonoli, N.Amati, M.Giansoldati, A.Hughes, E.Schaltz, A.Noume, M.Risser, C.Vasile, A.Coulibaly, C.Hariharan, E.Inci, H.Lee, Y.Lei, Sh.Ruan, Y.Fu, M.Yoshio, J.Yang, Sh.Hu, M.Ehsani, Y.Gao, S.Chauhan, Q.Zhang, C. Yang, А.Аксёнов, В.Водовозов, В.Иванов, В.Я.Двадненко, С.Н.Думнов, и многие другие, занимались вопросами обоснования рекуперативной системы торможения и ее эффективности в электромобилях и гибридных электромобилях.

В Узбекистане в этом направлении активную исследовательскую деятельности вели такие учёные как С.М.Кадыров, А.А.Мухитдинов, Б.И.Базаров, Ш.П.Алимухаммедов, С.К.Рузимов, Ж.Ш.Иноятходжаев, Г.Яхшиликова, О.А. Туйчиев, Ф.Ш. Умеров, , Ж. Мавлонов и другие.

Однако, исследования по обоснованию рекуперативного торможения в легковых автомобилях с электрическим приводом не были изучены на достаточном уровне.

Связь темы диссертационного исследования с планами научных работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Основная часть диссертационного исследования выполнена в Научно-исследовательской лаборатории электромобилей и их инфраструктуры при Туринском Политехническом Университете в г. Ташкенте, АО “Узавтосаноат”. Также, часть исследования была выполнена в рамках проекта 101128065- « Устойчивый транспорт в рамках “Зеленого соглашения”».

Целью исследования является обоснование эффективности рекуперативного торможения легкового автомобиля с электрическим приводом, позволяющего достичь высоких показателей энергетической эффективности и экологической безопасности с учётом требований к динамике.

Задачи исследования:

изучение текущих разработок и исследований современных систем рекуперативного торможения в электромобилях;

использование математической модели движения автомобиля с электрической машиной, которая позволяет осуществить расчёты расхода электрической энергии при движении автомобиля на нормированных ездовых циклах с использованием системы рекуперативного торможения;

создание имитационной модели с использованием MATLAB/Simulink для продольного движения легкового автомобиля с электрическим приводом на различных ездовых циклах с включенной системой рекуперативного торможения для автомобилей с передним и задним приводом;

определение основных переменных, влияющих на объем энергии, вырабатываемой рекуперативной системой торможения в электромобилях;

экспериментальное исследование с целью оценки надежности разработанной имитационной модели продольного движения автомобиля с электрическим приводом;

Объектом исследования является легковой автомобиль малого класса с электрическим задним приводом.

Предметом исследования составляют электрический привод и системы электронного управления, связанные с ним.

Методы исследования. Исследование включало изучение и обобщение теоретических и экспериментальных работ при использовании рекуперативной системы торможения в легковых автомобилях с электрическим приводом, методы расчёта продольной динамики автомобиля и его энергоэффективности, методы эксперимента, регрессионный анализ нелинейного характера, методы имитационного моделирования и математической статистики.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

улучшена энергетическая эффективность (до 35%) при движении автомобиля малого класса с электрическим приводом на ездовых циклах на основе математической модели продольной динамики автомобиля и

разработанной имитационной модели;

разработан алгоритм управления системой рекуперативного торможения, основанный на распределении тормозных усилий между фрикционной и рекуперативной системами в автомобилях малого класса с электрическим приводом;

обоснованы основные факторы, влияющие на количество энергии, вырабатываемой в процессе рекуперативного торможения;

обоснована методика экспериментальной оценки достоверности имитационной модели продольной динамики автомобиля путём их сравнения с результатами полевых испытаний;

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

обоснованы основные факторы, влияющие на объём рекуперированной энергии в процессе торможения автомобиля малого класса с электрическим приводом;

разработан алгоритм управления системой рекуперативного торможения, способный увеличить объём рекуперированной энергии в автомобилях малого класса с электрическим приводом;

продемонстрировано влияние расположения электрического привода (переднеприводный и заднеприводный) для улучшения энергетической эффективности в процессе торможения;

Достоверность результатов исследования. Результаты исследования подтверждаются экспериментами, использованием современных методов и теоретическим обоснованием параметров и режимов работы, основанных на принципах теоретической механики и высшей математики. Экспериментальные данные обрабатываются математико-статистическими методами. Тот факт, что результаты исследования применимы как в научных лабораториях, так и в конструкторских центрах, объясняет их взаимную пригодность.

Научно-практическая значимость результатов исследования. Результаты этого исследования могут быть использованы для доказательства научной значимости рекуперативного торможения в электромобилях.

Практическая значимость результатов исследования обосновывается разработанным адаптивным алгоритмом управления системой рекуперативного торможения легковых автомобилей, оснащенных электрическим приводом. К тому же практическая значимость проведённого исследования способствует уменьшению выбросов вредных отработанных газов, а также и улучшение энергетической экономичности автомобиля путём возврата части кинетической энергии автомобиля в процессе торможения.

Применение результатов исследования. На основе результатов, полученных при обосновании эффективности рекуперативного торможения легкового автомобиля с электрическим приводом:

обоснование основных факторов, влияющих на количество возобновляемой энергии в процессе торможения автомобиля малого класса с электрическим приводом, внедрено в ООО "BYD Uzbekistan Factory" (справка АО "Узавтосаноат" № 20/04-25-1029 от 23 июня 2026 года). В результате было показано, что эти факторы могут увеличить объем возвращенной энергии до 35 процентов.

алгоритм управления системой регенеративного торможения, позволяющий увеличить объем возобновляемой энергии в автомобилях малого класса с электрическим приводом, внедрен в ООО "BYD Uzbekistan Factory" (справка АО "Узавтосаноат" от 23 июня 2026 года № 20/04-25-1029). Его использование позволяет сэкономить до 550 тысяч сумов на автомобиле малой категории, оснащённом одним электроприводом.

значение расположения электропривода (передней и задней передач) для повышения энергоэффективности в процессе торможения внедрено в ООО "BYD Uzbekistan Factory" (справка АО "Узавтосаноат" от 23 июня 2026 года № 20/04-25-1029). В результате переднеприводные автомобили получили возможность восстанавливать энергию на 33-35% в процессе рекуперации в зависимости от цикла движения.

Апробация результатов исследования. Ключевые результаты данной диссертационной работы были представлены на ознакомление в АО "Узавтосаноат"; ООО "BYD Uzbekistan Factory", в Туринском Политехническом университете в г. Ташкенте; в 13 международных научно-практических конференциях и семинарах.

Публикация результатов исследования. В общей сложности по теме диссертации опубликовано 27 научных работ. Из них 13 научных статей опубликованы в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Кабинете Министров Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 4 — в зарубежных (международных) и 9 — в республиканских журналах. Три работы опубликованы в сборниках материалов конференций, входящих в международную базу данных Scopus. Остальные 10 работ опубликованы в сборниках материалов международных и республиканских научно-технических конференций. Кроме того, в ходе исследования получено одно авторское свидетельство на программное средство расчёта (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, выводов, списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и необходимость проведённых научных исследований, поставлены цель и задачи исследования, охарактеризованы объект и предмет работы. Продемонстрировано соответствие темы приоритетным направлениям развития науки и

технологий Республики Узбекистан. Изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыты теоретическое и прикладное значение полученных выводов. Приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, данных об апробации работы, опубликованных научных трудах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной **«Системный анализ современного состояния экологической безопасности автомобильного транспорта»**, проведён углублённый анализ эволюции тормозных систем в легковых автомобилях. Проведен обзор по стандартам для тормозных систем. Был детально изучен вопрос алгоритмов управления рекуперативным торможением. В главе реализован научный обзор современных тенденций в области режимов управления рекуперацией. Каждый из существующих режимов описан по принципу работы, преимуществам и недостаткам, а также возможным ограничениям. На основе проведённого анализа обоснованы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе диссертации, озаглавленной **«Математическая модель продольной динамики автомобиля и его тягового агрегата с источником энергии»**, описана математическая модель продольного движения легкового автомобиля с электрическим приводом. К тому же, приводится имитационная модель в пакете программного обеспечения MATLAB/Simulink для оценивания энергетической эффективности рекуперативного торможения при различных режимах торможения и на различных стандартизированных ездовых циклах. В качестве основной модели была использована прямая модель легкового автомобиля с электрическим приводом, изображенная на Рис.1.

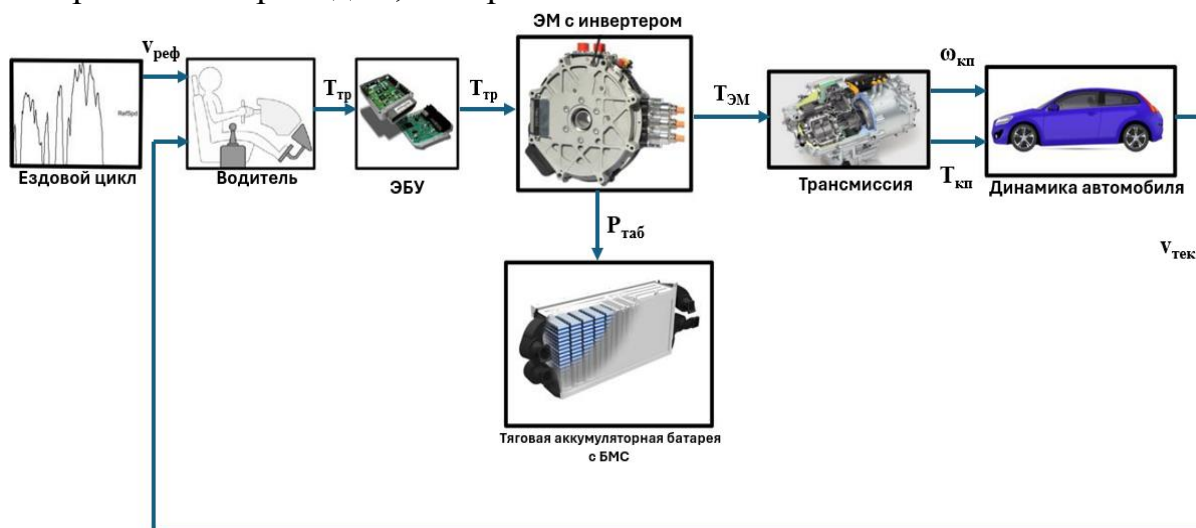


Рис. 1 – Прямая модель продольной динамики легкового автомобиля с электрическим приводом.

Для описания математической модели тягового агрегата была использована многопараметрическая характеристика электрической машины, работающей в режиме тяги/генератора (Рис. 2).

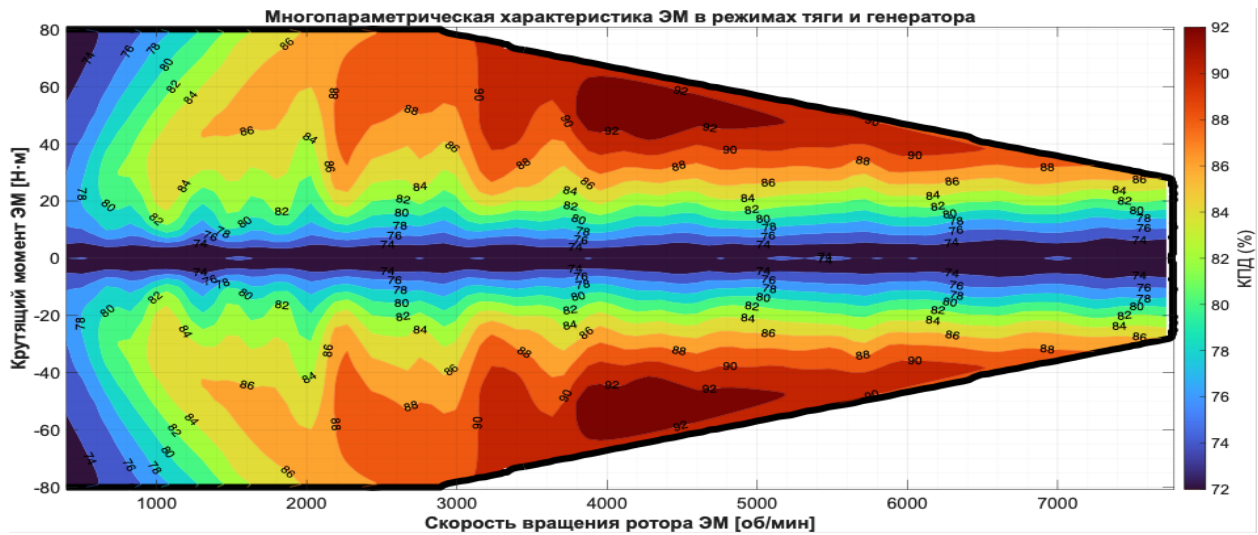


Рис. 2 – Многопараметрическая характеристика электрической машины.

С помощью характеристики электрической машины, изображенной на Рис. 2 можно вычислить требуемую мощность в режимах тяги $P_{\text{мот}}$ и генератора $P_{\text{ген}}$ соответственно, с учётом КПД в искомом режиме работы:

$$\begin{cases} P_{\text{мот}} = \frac{T_{\text{мот}} \omega_{\text{мот}}}{\eta_{\text{мот}}}, \\ P_{\text{ген}} = \eta_{\text{ген}} T_{\text{ген}} \omega_{\text{ген}} \end{cases} \quad (1)$$

Изолинии коэффициентов полезного действия электрической машины описываются полиномом от двух переменных:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{мот}} = & p_{00} + p_{10}\omega_{\text{н.эм}} + p_{01}T_{\text{н.эм}} + p_{20}\omega_{\text{н.эм}}^2 + p_{11}\omega_{\text{н.эм}}T_{\text{н.эм}} + p_{02}T_{\text{н.эм}}^2 \\ & + p_{30}\omega_{\text{н.эм}}^3 + p_{21}\omega_{\text{н.эм}}^2T_{\text{н.эм}} + p_{12}\omega_{\text{н.эм}}T_{\text{н.эм}}^2 + p_{03}T_{\text{н.эм}}^3 \\ & + p_{40}\omega_{\text{н.эм}}^4 + p_{31}\omega_{\text{н.эм}}^3T_{\text{н.эм}} + p_{22}\omega_{\text{н.эм}}^2T_{\text{н.эм}}^2 + p_{04}T_{\text{н.эм}}^4 \\ & + p_{50}\omega_{\text{н.эм}}^5 + p_{41}\omega_{\text{н.эм}}^4T_{\text{н.эм}} + p_{32}\omega_{\text{н.эм}}^3T_{\text{н.эм}}^2 + p_{23}\omega_{\text{н.эм}}^2T_{\text{н.эм}}^3 \\ & + p_{14}\omega_{\text{н.эм}}T_{\text{н.эм}}^4 + p_{05}T_{\text{н.эм}}^5 \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты аппроксимации p_{ij} имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} p_{00} = 71.14; p_{10} = 10.9; p_{01} = -1.564; p_{20} = -144.5; p_{11} = 1087; p_{02} = 46.26; \\ p_{30} = 393.7; p_{21} = -2848; p_{12} = -1946; p_{03} = -273.9; p_{40} = -375.4; \\ p_{31} = 2195; p_{22} = 5055; p_{13} = 813; p_{04} = 460.4; p_{50} = 114.4; p_{41} = -456.4; p_{32} = -2517; p_{23} = -1972; \\ p_{14} = 88.34; p_{05} = -234.1. \end{aligned}$$

Коэффициенты p_{ij} были определены с помощью регрессионного анализа от двух переменных.

Максимальное значение крутящего момента электрической машины-кривая, ограничивающая область функционирования. Данная кривая описывается функцией от угловой скорости ЭМ:

$$\begin{aligned} T_{\text{мот.макс}} = & -2932\omega_{\text{эм}}^6 + 7317\omega_{\text{эм}}^5 - 6378\omega_{\text{эм}}^4 + 2251\omega_{\text{эм}}^3 - 344.6\omega_{\text{эм}}^2 \\ & + 21.16\omega_{\text{эм}} + 79.67 \end{aligned} \quad (3)$$

Математическая модель тяговой аккумуляторной батареи была выражена с помощью теоремы Тевенина в качестве открытого контура, содержащего источник напряжения с электродвижущей силой ЭДС

Е и внутреннего сопротивления. Ввиду разного поведения источников питания в процессе заряда и разряда, модель тяговой аккумуляторной батареи подразумевает разные сопротивления для заряда $R_{зар}$ и разряда $R_{раз}$ соответственно. Многочисленные исследования показывают, что в подобных моделях ЭДС и сопротивления непосредственно зависят от степени заряженности батареи СЗБ (SOC), т.е. $E=f(SOC)$, $R_{зар}=f(SOC)$, $R_{раз}=f(SOC)$.

Данная модель позволяет вычислить электрический ток при заряде $I_{зар}$ и при разряде $I_{раз}$, используя следующие формулы:

$$I_{раз} = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4R_{раз}P_t}}{2R_{раз}} \quad (4)$$

$$I_{зар} = \frac{\sqrt{E^2 + 4R_{зар}P_t} - E}{2R_{зар}} \quad (5)$$

Динамическое изменение степени заряженности батареи определяется выражением

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_0^{t^*} I_{раз} dt}{Q_{ном.Ач}} + \frac{\int_0^{t^*} I_{зар} dt}{Q_{ном.Ач}} \quad (6)$$

где SOC_0 - степень заряженности батареи в момент начала отсчёта, t^* - конечное время отсчёта, выраженное в секундах, $Q_{ном.Ач}$ - номинальная ёмкость, выраженная в Ампер-секундах.

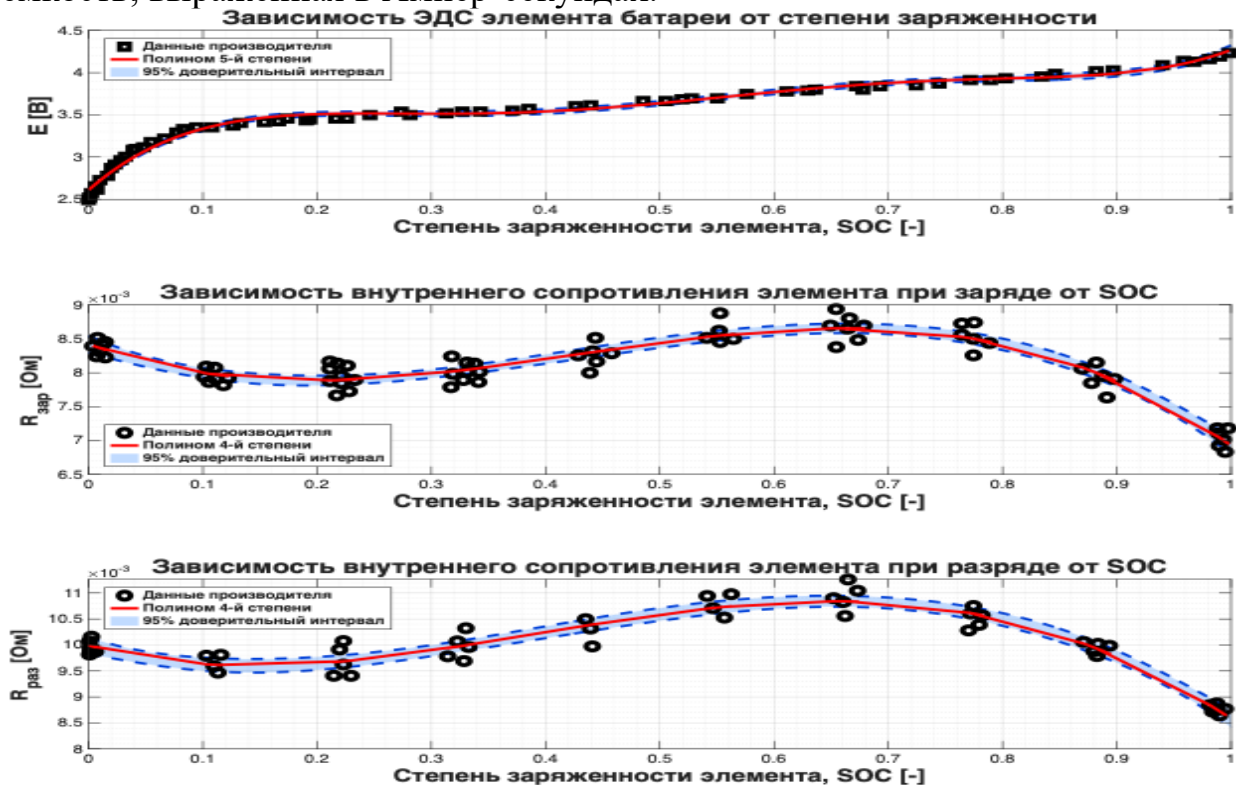


Рис. 3 – Зависимости ЭДС и внутренних сопротивлений от степени заряженности одного элемента литий-ионной батареи

Согласно данным, изображённым на Рис. 3, электродвижущая сила батареи и её внутренние сопротивления в процессе заряда и разряда зависят от степени заряженности. Эти зависимости можно описать математически:

$$E(SOC) = 47.25SOC^5 - 129.79SOC^4 + 129.25SOC^3 - 57.88SOC^2 + 11.79SOC + 2.62 \quad (7)$$

$$R_{зар}(SOC) = 0.0002SOC^4 - 0.0017SOC^3 + 0.0019SOC^2 - 0.0005SOC + 0.0008 \quad (8)$$

$$R_{раз}(SOC) = 0.0005SOC^4 - 0.0028SOC^3 + 0.0028SOC^2 - 0.0006SOC + 0.001 \quad (9)$$

Для одного элемента были представлены вышеупомянутые рекомендации относительно зависимостей ЭДС и внутренних сопротивлений батареи. Ур. 10 позволяет осуществить масштабирование тяговой аккумуляторной батаери и добиться необходимых значений напряжения и ёмкости:

$$\begin{cases} R_{зар} = R_{зар.эл} \frac{N_{пос}}{N_{пар}} \\ R_{раз} = R_{раз.эл} \frac{N_{пос}}{N_{пар}} \\ E = E_{эл} N_{пос} \\ Q_{ном.Ач} = Q_{ном.Ач.эл} N_{пар} \end{cases} \quad (10)$$

где $N_{пос}$ - количество элементов, подключенных последовательно;
 $N_{пар}$ - количество элементов, подключенных параллельно.

Продольную динамику автомобиля (Рис. 4) можно описать следующим дифференциальным уравнением (Ур. 11):

$$m \frac{dv}{dt} = (F_{тп} + F_{тз}) - (F_{кп} + F_{кз} + F_a + F_g), \quad (11)$$

где $F_{тп}$ - сила тяги (торможения) на передних колёсах;

$F_{тз}$ -сила тяги (торможения) на задних колёсах;

$F_{кп}$ -сила трения качения на передних колёсах;

$F_{кз}$ - сила трения качения на задних колёсах;

F_a - сила аэродинамического сопротивления;

F_g -сила сопротивления из-за уклона дороги;

m - масса автомобиля.

v - скорость автомобиля;

α - угол уклона дороги.

Силы трения качения на передних и задних колёсах автомобиля можно объединить в одну силу трения качения F_k , которую можно описать следующим математическим выражением (Ур. 12):

$$F_k = f_k mg \cos(\alpha), \quad (12)$$

где f_k - коэффициент трения качения автомобильной шины с поверхностью дороги.

Сила аэродинамического сопротивления зависит от скорости автомобиля v , коэффициента аэродинамического лобового сопротивления C_d , площади проекции лобовой части автомобиля A и плотности воздуха ρ . Сила аэродинамического сопротивления описывается математическим уравнением вида (Ур. (13)):

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A (v - v_v)^2, \quad (13)$$

где v_v - составляющая скорости ветра, попутная движению автомобиля.

При изучении продольной динамики автомобиля, движущегося по дороге с углом наклона α также важно учитывать сопротивление движению, вызванное гравитацией. Это нечто иное, как сила сопротивления из-за уклона дороги F_g , выражаемой уравнением (Ур. 14)

$$F_g = mg \sin(\alpha) \quad (14)$$

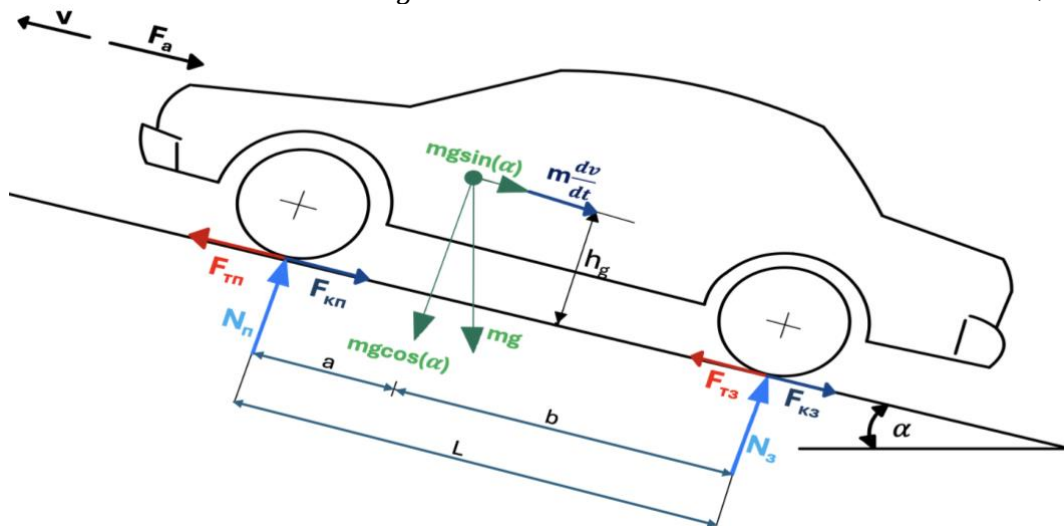


Рис.4 Силевая схема продольной динамики автомобиля

Параллельная стратегия управления рекуперативным торможением подразумевает одновременное использование электрического привода и фрикционной тормозной системы в момент нажатия водителем на педаль тормоза. Однако, при движении накатом активируется исключительно рекуперативная составляющая тормозной системы в виду того, что сила трения между автомобильными шинами и дорожным полотном вызывает сопротивление движению. Основная структура алгоритма управлением РТ приведена на Рис. .

С целью улучшения энергетической эффективности торможения и сохранения безопасности торможения, предлагается алгоритм управления рекуперативным торможением, приведенным на Рис.6. Данный алгоритм распределяет тормозные усилия таким образом, что в случаях обычного торможения ($\beta < 0.7$) тормозное усилие распределяется согласно I-кривой, и электрическая машина в режиме генератора обеспечивает тормозной момент на заднем мосту.

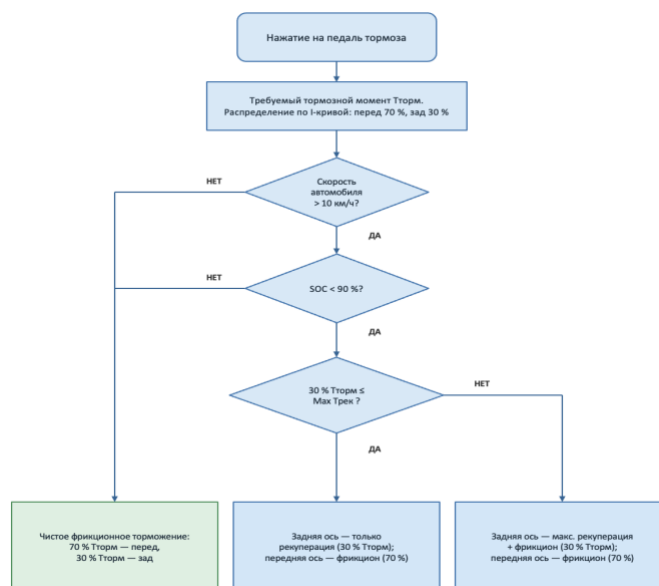


Рис. 5 Параллельная стратегия управления рекуперативным торможением

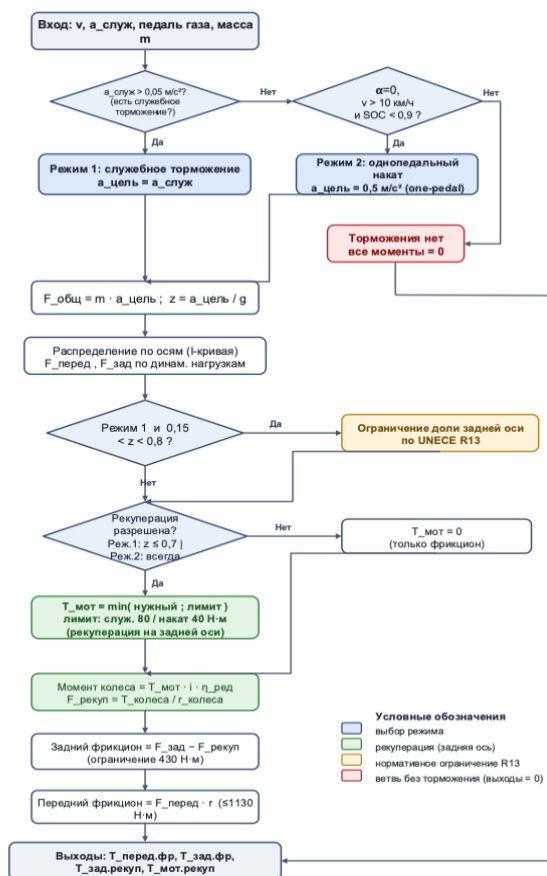


Рис. 6 Предлагаемая стратегия управления рекуперативным торможением

На Рис. 7 представлена динамика параметров движения и работы силовой электроустановки электромобиля при выполнении ездового цикла NEDC для двух сценариев начального уровня заряда тяговой батареи: $SOC_0=80\%$ и $SOC_0=100\%$.

В случае $SOC_0=100\%$, напротив, рекуперация не функционирует до тех пор, пока степень заряженности батареи не упадет ниже значения 95% . На ездовом цикле NEDC рекуперация включается лишь на последнем отрезке

торможения (1150–1180 секунды), что подтверждается графиками крутящего момента электрической машины и силы электрического тока на батарее.

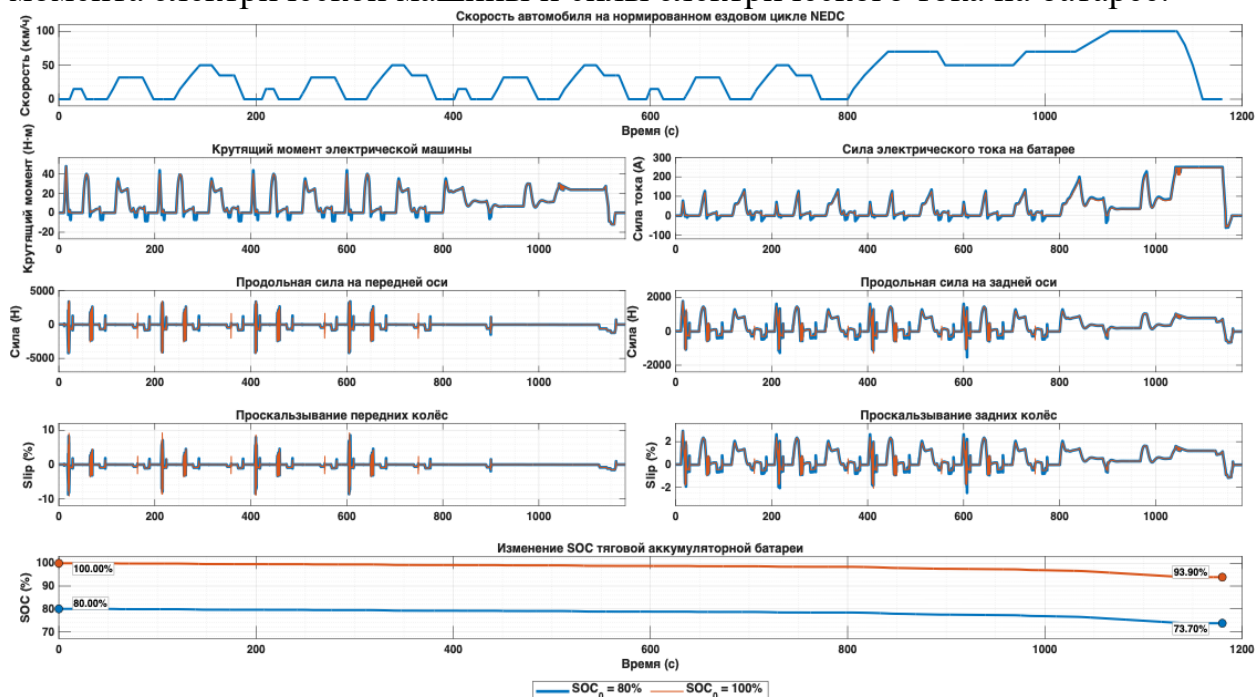


Рис. 7 График изменения от времени скорости автомобиля, крутящего момента электрической машины и силы электрического тока на тяговой аккумуляторной батарее, продольной силы на передней и задней осях, проскальзывание передних и задних колёс, а также степени заряженности батареи на ездовом цикле NEDC

Таблица 1 обобщает влияние начальной степени заряженности тяговой батареи на энергетическую экономию при выполнении различных ездовых циклов. При снижении начального SOC с 100% до 80% наблюдается увеличение доли рекуперативного торможения, что приводит к меньшему расходу заряда и, как следствие, к повышению энергетической эффективности. Наибольший эффект экономии достигается в цикле WLTC, что объясняется более динамичным характером профиля движения и большим числом фаз торможения, а также большей протяжённостью ездового цикла. В то же самое время все три ездовых цикла показали примерно одинаковую удельную экономию электрической энергии на 1 км пройденного пути.

Таблица 1

Влияние начальной степени заряженности батареи на энергетическую эффективность рекуперативного торможения на ездовых циклах NEDC, WLTC, CLTC

Ездовой цикл	Начальная степень заряженности (%)	Конечная степень заряженности (%)	Разница (% SOC)	Экономия энергии (кВтч)	Протяжённость ездового цикла (км)
NEDC	100	93.90	0.20	0.03	11.02
	80	73.70			
WLTC	100	84.17	0.43	0.06	23.66
	80	63.74			
CLTC	100	92.16	0.28	0.04	14.7
	80	71.88			

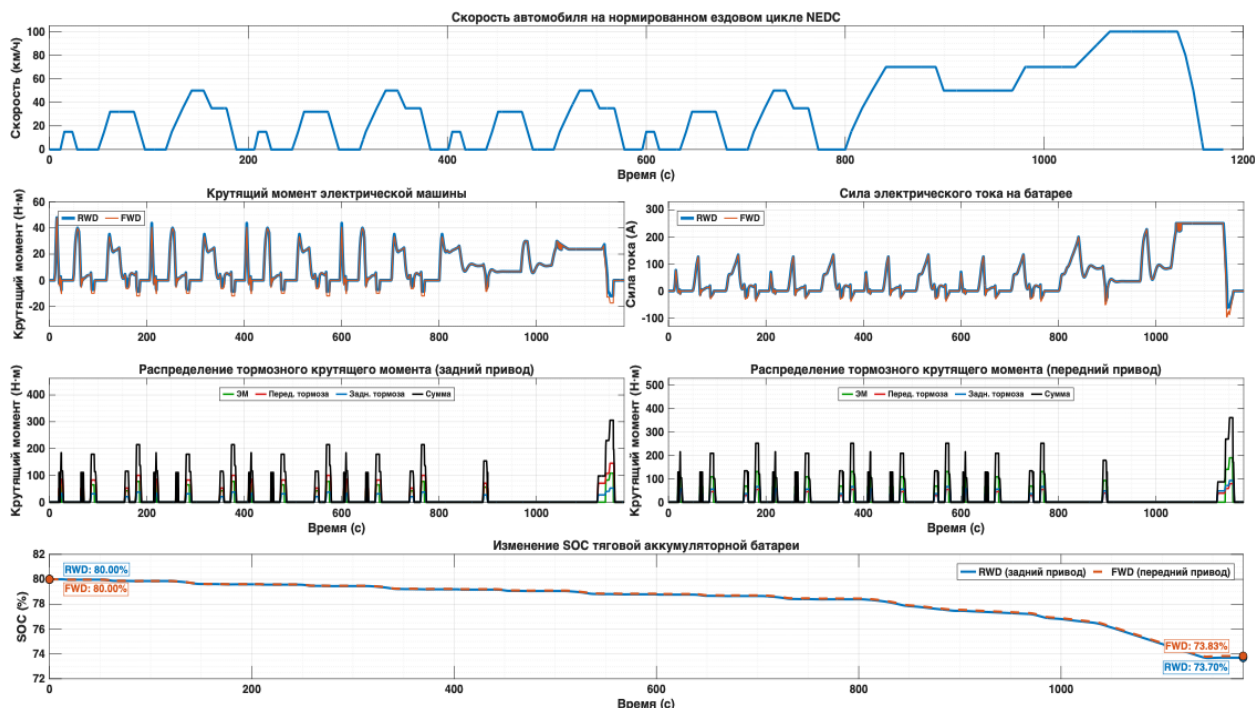


Рис. 8 Сравнение зависимостей от времени крутящего момента электрической машины, силы электрического тока на батарее и распределения тормозного крутящего момента, а также степени заряженности батареи на переднеприводном и заднеприводном автомобилях (при всех прочих равных параметрах) на ездовом цикле NEDC

Сравнение динамики степени заряженности батареи с потреблением и рекуперацией энергии показано на Рис. 8, что подтверждает преимущество переднеприводной топологии. Темп снижения SOC для FWD-варианта значительно ниже благодаря большому количеству эффективных фаз рекуперативного торможения.

Таблица 2 показывает, что в каждом из трех ездовых циклов доля возврата энергии FWD-модели превышает долю заднеприводного варианта. Эти результаты согласуются с этими данными. Например, объем рекуперации на WLTC составляет 0,060 кВтч вместо 0,036 кВтч, а на CLTC-0,039 кВтч вместо 0,025 кВтч. Это отличается от NEDC, который составляет 0,022 кВтч вместо 0,014 кВтч. Сопоставление поведения электромобиля в различных типах ездовых циклов показывает, насколько устойчивы ранее упомянутые закономерности.

Таблица 2

Влияние топологии привода (переднеприводный/заднеприводный) на энергетическую эффективность рекуперативного торможения на ездовых циклах NEDC, WLTC, CLTC

Ездовой цикл	Привод	Израсходованная энергия (кВтч)	Энергия рекуперации (кВтч)	Доля рекуперации (%)	Экономия энергии (кВтч)	Протяжённость ездового цикла (км)
NEDC	RWD	0.83	0.045	5,45	0.028	11.02
	FWD	0.81	0.052	6,43		
WLTC	RWD	2.12	0.12	5,73	0.05	23.66
	FWD	2.09	0.14	6,82		
CLTC	RWD	1.08	0.068	6,35	0.032	14.7
	FWD	1.06	0.080	7,62		

На режимах торможения, где штатный алгоритм ограничивает рекуперацию из-за рисков снижения сцепления на задней оси, предлагаемый метод обеспечивает более плавный и устойчивый профиль тормозного момента, что позволяет задействовать больший объём кинетической энергии автомобиля для последующего преобразования в электрическую.

Графики изменения степени заряженности батареи, потребления энергии и объёма рекуперации (Рис. 9) подтверждают преимущества предлагаемой стратегии управления. Следует отметить, что при использовании обоих алгоритмов суммарный тормозной момент, применимый в процессе замедления, остаётся неизменным, так как он зависит в основном от профиля скорости и габаритов автомобиля. При всех ездовых циклах наблюдается меньшая скорость снижения SOC и больший кратный прирост отрицательной составляющей тока при торможении.

Таблица приводит значения расхода энергии и рекуперированной мощности для каждого ездового цикла. Для цикла NEDC предлагаемый алгоритм снижает расход энергии с 0.83 до 0.82 кВт·ч и увеличивает рекуперацию с 0.045 до 0.060 кВт·ч, что соответствует приросту 35%. В цикле WLTC прирост эффективности составляет 33%: объём рекуперированной энергии возрастает с 0.12 до 0.16 кВт·ч при одновременном снижении расхода с 2.12 до 2.11 кВт·ч. На CLTC, который является более вариативным и содержит большое число низкоскоростных фаз, новый алгоритм даёт прирост рекуперации 32% (с 0.068 до 0.089 кВт·ч) при снижении расхода энергии с 1.08 до 1.07 кВт·ч. Во всех случаях предлагаемый метод демонстрирует устойчивую тенденцию к увеличению объёма энергии, возвращаемой в аккумулятор, без ухудшения динамических характеристик автомобиля.

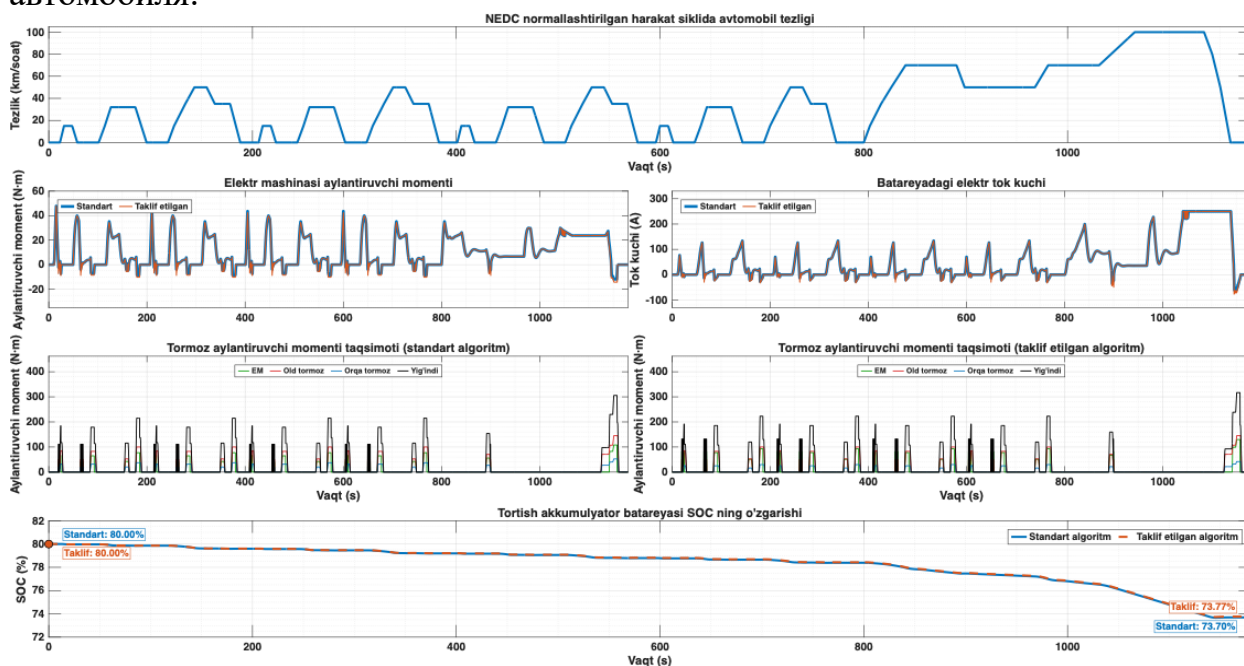


Рис. 9 Сравнение зависимостей от времени крутящего момента электрической машины, силы электрического тока на батарее и распределения тормозного крутящего момента, а также степени заряженности батареи на заднеприводном электромобиле с применением штатного и предлагаемого алгоритма управления рекуперативным торможением (при всех прочих равных параметрах) на ездовом цикле NEDC

Таблица 3

Сравнение влияния алгоритма управления рекуперативным торможением на энергетическую эффективность рекуперативного торможения на ездовых циклах NEDC, WLTC, CLTC

Ездовой цикл	Алгоритм	Израсходованная энергия (кВтч)	Энергия рекуперации (кВтч)	Доля рекуперации (%)	Прирост рекуперации (%)	Протяжённость ездового цикла (км)
NEDC	Штатный	0.83	0,045	5,45	35%	11.02
	Предлагаемый	0.82	0.060	7,36		
WLTC	Штатный	2.12	0.12	5,73	33%	23.66
	Предлагаемый	2.11	0.16	7,62		
CLTC	Штатный	1.08	0.068	6,35	32%	14.7
	Предлагаемый	1.07	0.089	8,38		

На Рис.10 представлен выполнен полный энергетический баланс процесса замедления: кинетическая энергия, теряемая автомобилем при торможении (с учётом коэффициента вращающихся масс δ), распределялась между каналами - возвратом в тяговую батарею, потерями в системе рекуперации (электрическая цепь и трансмиссия), фрикционными тормозами, а также невозвратными аэродинамическим сопротивлением и сопротивлением качению. ездовые циклы NEDC, WLTC, CLTC.

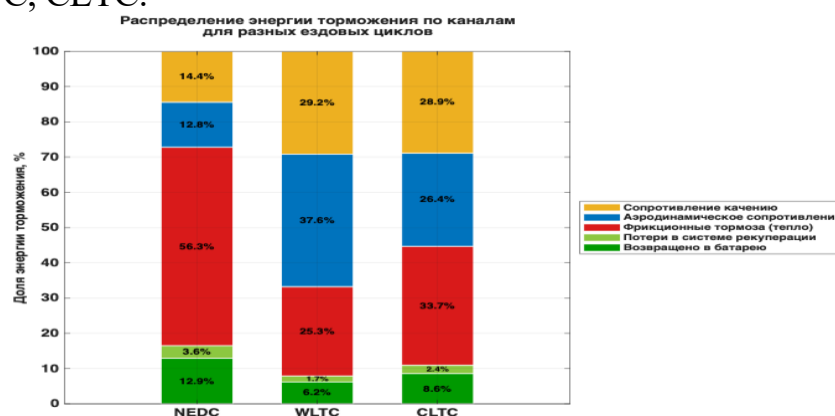


Рис. 10 Распределение полной энергии торможения на ездовых циклах NEDC, WLTC и CLTC

В третьей главе под названием **“Практические исследования рекуперативного торможения легкового автомобиля с электрическим приводом”** описаны дорожные и полигонные испытания легкового автомобиля с электрическим приводом, а также состава и возможностей измерительного оборудования, использованного для регистрации параметров рекуперативного торможения и оценки достоверности полученных экспериментальных данных.

Для регистрации параметров силовой установки и тяговой аккумуляторной батареи применялся система интеллектуальной диагностики SmartSafe P01, представляющий собой специализированный комплекс для диагностики электрических и гибридных транспортных средств, основанный на планшетном ПК с выносным интерфейсным модулем.

На Рис. 11 представлена структурная схема аппаратно-программного комплекса для диагностики и мониторинга параметров автомобиля в реальном

времени. Источником данных является электронная система управления автомобиля (ЭБУ), подключённая через стандартный диагностический интерфейс OBD-II. Сигналы с бортовой сети передаются на диагностический адаптер, который выполняет функции считывания, первичной обработки и беспроводной передачи данных по протоколу Bluetooth.

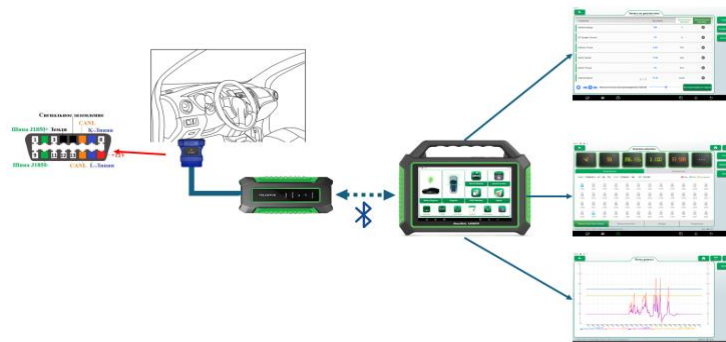


Рис. 11 Архитектура системы сбора и визуализации диагностических данных автомобиля

Процедура проведения полигонных испытаний включала следующие этапы:

1. Запуск автомобиля. Проверка исправности оборудования. При готовности обратный отсчет 5 секунд до начала движения.
2. Разгон автомобиля до фиксированной скорости (мин. Скорость= 20км/ч, шаг увеличения скорости= 10км/ч).
3. Удержание скорости в течение 8–15 секунд для стабилизации показаний силы электрического тока на приборной панели автомобиля.
4. Отпускание педали акселератора и дальнейшее движение накатом до полной остановки. Зафиксировать значения силы тока до отпускания педали акселератора и в начале движения накатом. Вернуться на исходное положения проведения испытаний.
5. Повторить шаги 2–4 29 раз.
6. Используя шаг увеличения скорости, установить новую фиксированную скорость. Повторение шагов 2–5.

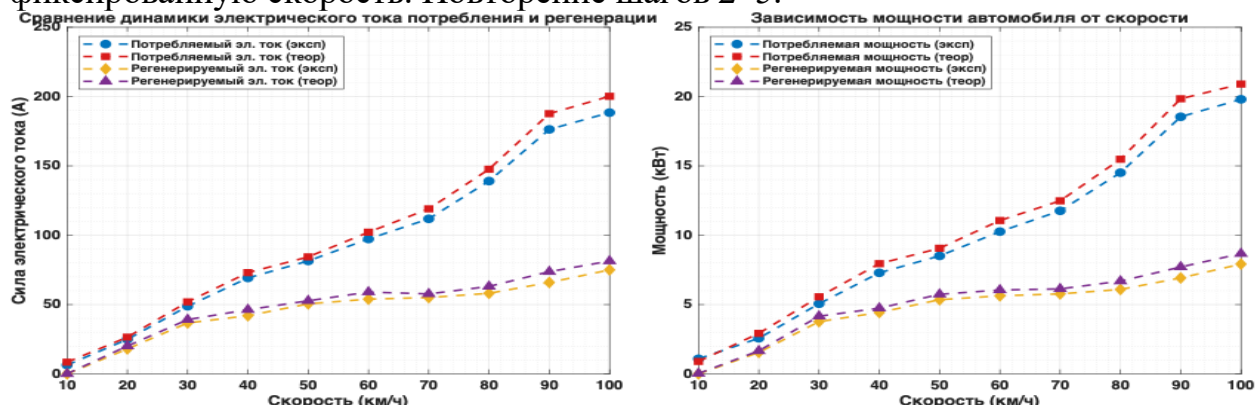


Рис. 12 Сравнение полигонных экспериментальных исследований и теоретических значений электрического тока и мощности электромобиля от скорости движения

На Рис. 12 приведено сравнение полигонных экспериментальных данных с теоретическими значениями электрического тока и мощности электромобиля в зависимости от скорости движения (слева - потребляемый и регенерируемый

ток, справа-соответствующая мощность). Точность имитационной модели оценивалась по показателям MAE, RMSE, MAPE и NRMSE.

Сводные метрики по току (Табл. 4) показали для потребляемого тока MAE = 4,4 А при RMSE = 5,21 А, для регенерируемого - заметно меньшие значения (2,00 А и 2,39 А), что свидетельствует о лучшей сходимости модели в режиме рекуперации; MAPE для обеих кривых составила около 4,55 %. Детальный анализ по скоростным режимам (Табл. 5) выявил систематический характер погрешностей, монотонно возрастающих с ростом скорости: расхождение по потребляемому току увеличивается с 2 А при 20 км/ч до 11 А при 100 км/ч. По мощности сводные метрики (Табл. 6) составили MAE = 1,07 кВт, RMSE = 1,18 кВт при MAPE не более 9 %. Детальные отклонения по мощности (Табл. 7) в диапазоне 20–60 км/ч не превышают 1,5 кВт, а при скоростях выше 70 км/ч возрастают до 1,5–2,0 кВт, что согласуется с картиной, наблюдаемой для тока. Полученные результаты подтверждают адекватность математической модели в рассматриваемом диапазоне эксплуатационных режимов.

Таблица 4

Сводные метрики качества имитационной модели при сравнении потребляемого и регенерируемого электрического тока

Параметр	MAE, А	RMSE, А	MAPE, %
Потребляемый ток	6.22	6.86	5.72
Регенерируемый ток	2.89	3.13	6.90
Суммарно	4.56	5.33	6.31

Таблица 5

Детальные отклонения расчётных и экспериментальных значений электрического тока по скоростным режимам

v, км/ч	Потр. эксп., А	Потр. имит., А	Δ потр., А	Реген. эксп., А	Реген. имит., А	Δ реген., А	MAPE, %
20	28	26	2.0	12	11	1.0	7.7%
30	42	39	3.0	18	16	2.0	9.1%
40	60	56	4.0	25	23	2.0	7.3%
50	82	77	5.0	33	31	2.0	6.1%
60	108	102	6.0	43	40	3.0	6.3%
70	138	131	7.0	54	51	3.0	5.3%
80	172	164	8.0	67	63	4.0	5.3%
90	210	200	10.0	81	77	4.0	4.9%
100	252	241	11.0	97	92	5.0	4.8%

Для проверки работоспособности имитационной модели в подобных условиях был выполнен второй этап верификации - по результатам городских заездов, проведённых в разное время суток. В каждый из рассматриваемых периодов - утреннее и дневное время - было проведено по 30 заездов, что обеспечило воспроизводимость условий и достаточный объём данных для статистической обработки.

На Рис. 13 в качестве примера приведён один из заездов, выполненных в дневное время. Цикл отличается меньшей продолжительностью (около 4000 с) при сохранении того же диапазона скоростей, что отражает иные условия транспортного потока в течение дня. Качественная картина согласования

сохраняется: расчётные и экспериментальные зависимости тока, напряжения и крутящего момента близки на всём протяжении заезда, а степень заряда к концу цикла составляет 64,46 % по модели против 62,21 % по эксперименту (расхождение около 2,25 процентного пункта). Близость относительного отклонения степени заряда для независимых заездов, выполненных в разное время суток, свидетельствует об устойчивости разработанной модели к изменению режима движения и подтверждает её адекватность в широком диапазоне эксплуатационных условий.

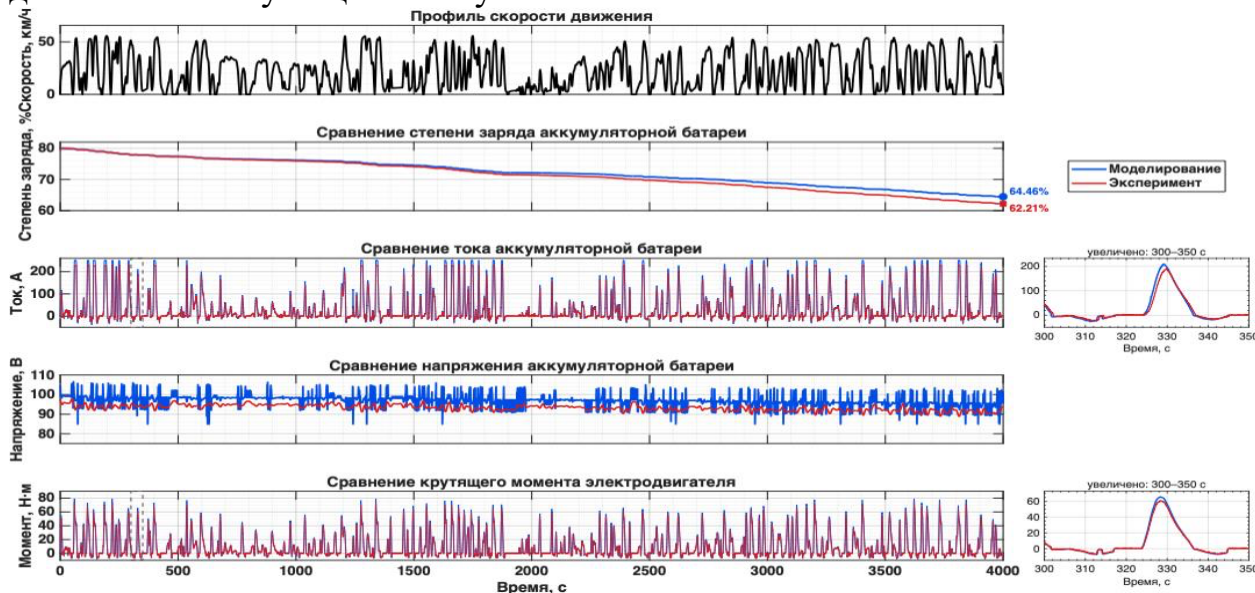


Рис. 13 Сопоставление расчётных и экспериментальных параметров электромобиля в городском ездовом цикле (дневное время)

Согласно Таблице 6, относительные показатели точности близки к утренним значениям (MAPE по напряжению 3,64 %, MAPE по степени заряда 1,27 %, NRMSE по моменту 2,16 %), а несколько большие абсолютные ошибки по току (MAE = 7,28 A, RMSE = 13,04 A) согласуются с более динамичным характером дневного транспортного потока и более высокими токовыми пиками. Коэффициент вариации остаётся в том же диапазоне (порядка 10–19 %), что говорит о сопоставимой повторяемости результатов независимо от времени суток

Таблица 6

Статистические показатели ошибки верификации имитационной модели по серии из 30 заездов в дневное время

Изучаемый параметр	Показатель	Среднее	СКО, σ	CV, %	95 % ДИ среднего
Ток батареи	MAE, A	7,28	1,07	14,7	6,88-7,68
	RMSE, A	13,04	1,71	13,1	12,40-13,68
	NRMSE, %	5,02	0,67	13,3	4,77-5,27
Напряжение	MAE, B	3,58	0,38	10,6	3,44-3,72
	RMSE, B	3,77	0,43	11,4	3,61-3,93
	MAPE, %	3,64	0,45	12,4	3,47-3,81
Крутящий момент	MAE, Н·м	1,02	0,19	18,6	0,95-1,09
	RMSE, Н·м	1,66	0,27	16,3	1,56-1,76
	NRMSE, %	2,16	0,23	10,6	2,07-2,25
Степень заряда	MAE, %	0,91	0,17	18,7	0,85-0,97
	RMSE, %	1,18	0,19	16,1	1,11-1,25
	MAPE, %	1,27	0,20	15,7	1,20-1,34

В Таблице 7 представлены результаты экспериментальной оценки потреблённой и рекуперированной энергии в реальных городских условиях для утреннего и дневного заездов. Энергии получены интегрированием мощности тяговой батареи по зарегистрированным сигналам тока и напряжения: потреблённая энергия составила 2,20 кВт·ч в утреннем и 2,10 кВт·ч в дневном заезде, а рекуперированная-0,128 и 0,132 кВт·ч соответственно, что отвечает доле рекуперации 5,82 % и 6,28 % от израсходованной энергии. Близость показателей для двух независимых заездов по одному маршруту сопоставимой протяжённости (27,81 и 26,64 км) свидетельствует о воспроизводимости результатов. Полученные значения доли рекуперации согласуются с расчётной для цикла WLTC (7,62 %) и подтверждают адекватность разработанной имитационной модели в условиях реальной городской эксплуатации.

Таблица 7

Результаты экспериментальной оценки потребленной и рекуперированной энергии в городских условиях эксплуатации

Период заезда	Потреблённая энергия, кВт·ч	Рекуперированная энергия, кВт·ч	Доля рекуперации, %	Дистанция, км	Удельная рекуперация, кВтч/км
Утренний заезд	2.20	0,128	5,82	27.81	0,0463
Дневной заезд	2,1	0,132	6,28	26,64	0,0495

В четвертой главе- “Расчёт экономического и экологического эффекта от рекуперативного торможения” приведены калькуляции экономии электрической энергии за счёт частичного возврата кинетической энергии в батарею электромобиля в процессе торможения. После приведены расчёты предотвращённых выбросов в атмосферу.

Удельная рекуперлируемая энергия e определяется как отношение возвращённой за цикл энергии W к пройденному пути L за ездовой цикл, т.е

$$e = \frac{W}{L} \quad (15)$$

По результатам имитационных исследований), в городском ездовом цикле WLTC, наиболее близком к реальным условиям эксплуатации, предложенный алгоритм управления рекуперативным торможением обеспечивает удельный возврат энергии 0,00676 кВт·ч/км против 0,00507 кВт·ч/км у штатного алгоритма.

Годовая рекуперлируемая энергия $W_{\text{год}}$ рассчитывается как

$$W_{\text{год}} = e \cdot L_{\text{год}} \quad (16)$$

где $L_{\text{год}}$ - среднегодовой пробег. При среднегодовом пробеге $L_{\text{год}} = 20\,000$ км, характерном для среднестатистической эксплуатации, годовой объём рекуперлируемой энергии составляет около 101,4 кВт·ч при штатном алгоритме и около 135,3 кВт·ч при предложенном. Таким образом, предложенный алгоритм дополнительно возвращает $\Delta W \approx 33,8$ кВт·ч в год на один автомобиль, что соответствует приросту объёма рекуперлируемой энергии на 33 % в цикле WLTC и до 35 % в цикле NEDC.

Годовая экономия средств определяется как

$$\mathcal{E} = W_{\text{год}} \cdot \mathcal{C}_{\text{эл}} \quad (17)$$

где $\mathcal{C}_{\text{эл}}$ - тариф на электроэнергию. При тарифе $\mathcal{C}_{\text{эл}} = 900$ сум/кВт·ч экономия за счёт рекуперации с предложенным алгоритмом составляет около 121 700 сум в год на автомобиль, из которых порядка 30 400 сум обеспечивается непосредственно применением предложенного алгоритма относительно штатного.

Следует отметить, что электромобили малого класса пользуются особой популярностью среди водителей такси и работников сферы доставки, ежедневный пробег которых может достигать 150-300 км, что значительно превышает пробег при обычной личной эксплуатации. Поскольку объём рекуперированной энергии прямо пропорционален пробегу, для данной категории пользователей экономический эффект возрастает кратно. Согласно Таблице 8, при интенсивной эксплуатации с годовым пробегом порядка 45 000-90 000 км (около 150-300 км в день при 300 рабочих днях) годовой объём рекуперированной энергии с предложенным алгоритмом составляет приблизительно 304-609 кВт·ч, что соответствует экономии порядка 274 000-548 000 сум в год на один автомобиль; при этом непосредственный вклад предложенного алгоритма относительно штатного составляет около 68 500-137 000 сум в год.

Таблица 8

Технико-экономическое обоснования результатов исследования в процессе эксплуатации

Режим эксплуатации (пробег)	Рекуперация всего, кВт·ч/год	Экономия всего, сум/год	Вклад алгоритма, кВт·ч/год	Вклад алгоритма, сум/год
Личная эксплуатация (20 000 км/год)	135	121 700	34	30 400
Такси/доставка, 150 км/день (≈45 000 км/год)	304	273 900	76	68 500
Такси/доставка, 300 км/день (≈90 000 км/год)	609	547 800	152	137 000

Экологический эффект рекуперации рассчитывается на базе экономического, так возвращённую в батарею энергию не нужно вырабатывать на электростанции. В энергосистеме Узбекистана преобладает тепловая генерация. Около 78% электроэнергии даёт природный газ, 7%- уголь². Уменьшение потребления сетевой энергии напрямую сокращает выбросы парниковых газов.

Годовая масса предотвращённых выбросов диоксида углерода рассчитывается по годовому объёму рекуперированной энергии, приведённому в предыдущем параграфе:

$$M_{CO_2} = \frac{W_{\text{год}} k_{CO_2}}{\eta_3}$$

где k_{CO_2} -удельные выбросы диоксида углерода на один киловатт-час

² По состоянию на 2023 год. Источник: <https://lowcarbonpower.org/region/Uzbekistan>

электроэнергии, η_3 - КПД зарядки тяговой батареи от сети.

На основании методологии механизма чистого развития ООН сетевой коэффициент выбросов для энергосистемы Узбекистан был рассчитан на уровне 0,499т CO₂/МВтч³. Оценка по полному жизненному циклу, с учитывающая добычу и транспортировку топлива, составляет 1,0 кг CO₂-экв/кВтч⁴. В расчёте принято консервативное значение $k_{CO_2}=0,50$ кг CO₂/кВтч.

При среднегодовом пробеге 20 000 км предложенный алгоритм возвращает 135,3 кВтч в год- с учётом КПД зарядки это примерно 150 кВтч сетевой электроэнергии и около 75 кг предотвращённых выбросов CO₂ на автомобиль в год. Из них около 19 кг CO₂ приходится непосредственно на вклад предложенного алгоритма. Полный жизненный цикл удваивает обе оценки – 150 и 38 кг CO₂-экв. соответственно.

При годовом пробеге 45 000 - 90 000 км, характерном для такси и служб доставки, рекуперация с предложенным алгоритмом достигает 304-609 кВтч в год, что соответствует 338-677 кВтч сетевой энергии и 169-338 кг предотвращённых выбросов CO₂ на автомобиль; непосредственный вклад алгоритма- 42-85 кг CO₂. Сводные результаты приведены в Таблице 9.

Таблица 9.

Экологический эффект рекуперативного торможения с предложенным алгоритмом управления

Показатель	Личная эксплуатация (20 000 км/год)	Коммерческая эксплуатация (45 000 – 90 000 км/год)
Годовая энергия рекуперации, кВтч	135,3	304-609
Эквивалентная сетевая энергии ($\eta_3 = 0,9$), кВтч	150	338-677
Предотвращённые выбросы CO ₂ , кг/год	75	169-338
в том числе вклад предложенного алгоритма, кг/год	19	42-85
Оценка по жизненному циклу, кг/год	150	338-677

ВЫВОДЫ

В результате исследования, выполненного по диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по техническим наукам на тему «Обоснование эффективности рекуперативного торможения в легковых автомобилях с электрическим приводом» были сделаны следующие выводы:

1. На основе анализа современного состояния вопроса выполнена классификация стратегий рекуперативного торможения (параллельная и последовательная) и алгоритмов управления (ПИД-регуляторы, нелинейные и адаптивные, на основе нечёткой логики, машинного обучения, интегрированные с системами ABS/ESC) с оценкой их применимости для электромобилей малого

³ https://cdm.unfccc.int/methodologies/standard_base/uzbekistan.pdf

⁴ <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>

класса. Установлено, что вопросы обоснования рекуперативного торможения для бюджетных легковых электромобилей с задним приводом изучены недостаточно, и показано, что для электромобилей рациональной является параллельная стратегия с оптимизированным распределением тормозных усилий.

2. Использована математическая модель продольной динамики электромобиля с электрической машиной, на основе которой выполнены расчёты расхода и возврата энергии на нормированных ездовых циклах NEDC, WLTC и CLTC. С применением предложенного алгоритма расход энергии составил 0,82 кВт·ч (NEDC, 11,02 км), 2,11 кВт·ч (WLTC, 23,66 км) и 1,07 кВт·ч (CLTC, 14,7 км), а объём рекуперированной энергии - 0,060, 0,16 и 0,089 кВт·ч соответственно, что отвечает доле рекуперации 7,36 %, 7,62 % и 8,38 % от израсходованной энергии.

3. Создана имитационная модель продольного движения легкового электромобиля в среде MATLAB/Simulink для переднеприводной и заднеприводной компоновок. Установлено, что переднеприводная компоновка обеспечивает больший объём рекуперации, чем заднеприводная (доля возвращаемой энергии в цикле WLTC - 6,82 % против 5,73 %, в CLTC - 7,62 % против 6,35 %). Разработанный алгоритм управления рекуперативным торможением, основанный на перераспределении тормозных усилий между фрикционной и рекуперативной системами, увеличивает объём рекуперированной энергии на 32-35 % относительно штатного (на 35 % в NEDC, 33 % в WLTC и 32 % в CLTC), повышая долю возвращаемой энергии до 8,38 % в цикле CLTC.

4. Определены и ранжированы основные переменные, влияющие на объём рекуперированной энергии: характер ездового цикла, топология привода, начальная степень заряженности батареи, КПД электромашины и инвертора, приёмная способность батареи и ПО BMS, распределение нагрузок по осям и сцепление, алгоритм тормозного блендинга. Установлено, что начальная степень заряженности является критическим фактором: при уровне, близком к 100 %, рекуперация блокируется системой управления батареи до снижения SOC ниже 95 %, в связи с чем рекомендуется не заряжать батарею выше 95 %.

5. Экспериментальными исследованиями при включённой и выключенной системе рекуперативного торможения (полигонные испытания при фиксированных скоростях и серии по 30 городских заездов в утреннее и дневное время) подтверждена достоверность разработанной модели: средняя абсолютная процентная ошибка по току на полигоне не превысила 4,55 %, в городских циклах нормированная среднеквадратичная ошибка по току составила 4,79-5,02 %, MAPE по напряжению - 3,53-3,64 %, по степени заряда - 1,26-1,27 % при коэффициенте вариации 10-19 % и узких доверительных интервалах (t-критерий Стьюдента, доверительная вероятность 0,95). Экспериментально измерены фактические значения энергии в городе (Таблица 3.9): рекуперировано 0,128 и 0,132 кВт·ч при расходе 2,20 и 2,10 кВт·ч, что соответствует доле рекуперации 5,82 % и 6,28 % и согласуется с расчётной долей для цикла WLTC.

**SCIENTIFIC COUNCIL PHD.03/2026.10.04.T.46.02 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT TURIN POLYTECHNIC UNIVERSITY IN
TASHKENT**

TURIN POLYTECHNIC UNIVERSITY IN TASHKENT

ASANOV SEYRAN ENVEROVICH

**JUSTIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF REGENERATIVE
BRAKING IN LIGHT VEHICLES WITH AN ELECTRIC DRIVE**

05.08.06 – Wheeled and tracked vehicles and their operation

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) IN TECHNICAL
SCIENCES**

Tashkent– 2026

The theme of Doctor of Philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan on the № B2023.4.PhD/T4296.

The dissertation was completed at the Turin polytechnic university in Tashkent.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council (www.turin.uz) and on the website of Information-educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: Inoyatkhodjaev Jamshid Shukhratullayevich
doctor of technical sciences, professor

Official opponents: Alimuxamedov Shavkat Pirmuxamedovich
doctor of technical sciences, professor

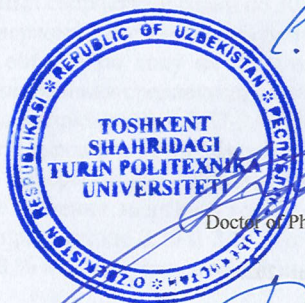
Mirzaliev Sanjar Mahamadjon ugli
doctor of philosophy in technical sciences, docent

Leading organization: Tashkent state technical university
named after I.A.Karimov

The defense of the will take place on "02" 11 2026 at 16⁰⁰ at the Scientific council No. PHD.03/2026.10.04.T.46.02 at the Turin polytechnic university in Tashkent (Address: 100095, Tashkent city, Little Ring Road, 17. Phone: (+99871) 203-07-77; e-mail: info@polito.uz)

The dissertation is registered in Information Resource Centre of the Turin polytechnic university in Tashkent (is registered number № 1/26). (Address: 100095, Tashkent city, Little Ring Road, 17. Phone: (+99871) 203-07-77; e-mail: info@polito.uz)

The abstract of the dissertation was distributed on "20" 10 2026 y.
(Protocol at the register. № 1 on "02" 09 2026 y.).



O.A.Tuychiev
Chairman of the Scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, associate professor

J.J.Karimov
Scientific secretary of Scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Philosophy in physics-mathematics, associate professor

S.K.Ruzimov
Chairman of the academic seminar under
The Scientific council awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, associate professor

DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON THE TECHNICAL SCIENCES

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Research compliance with the priorities of the republic's science and technology development. This research is part III of republican science and technology development. It was carried out within the priority direction "Energy, energy - resource efficiency, transport, machinery and equipment construction".

The purpose of this study is to demonstrate the effectiveness of regenerative braking in an electric passenger car, which enables high levels of energy efficiency and environmental safety while meeting dynamic performance requirements.

Tasks of the research:

a review of current developments and research on modern regenerative braking systems in electric vehicles;

the use of a mathematical model of a vehicle with an electric motor, which allows for the calculation of electrical energy consumption while the vehicle is operating on standardized driving cycles using a regenerative braking system;

developing a simulation model using MATLAB/Simulink for the longitudinal motion of an electric passenger car on various driving cycles with the regenerative braking system enabled for both front-wheel-drive and rear-wheel-drive vehicles;

identification of the main variables affecting the amount of energy generated by the regenerative braking system in electric vehicles;

experimental study to evaluate the reliability of the developed simulation model of the longitudinal motion of an electric vehicle;

The object of research is a small-class passenger car with electric rear-wheel drive.

The subject of research is the electric drive and its associated electronic control systems.

Research methods. The study involved reviewing and synthesizing theoretical and experimental work on the use of regenerative braking systems in electric passenger cars, methods for calculating a vehicle's longitudinal dynamics and energy efficiency, experimental methods, nonlinear regression analysis, simulation modeling methods, and mathematical statistics.

The scientific novelty of the research is as follows:

Energy efficiency has been improved by up to 35% for small electric vehicles during driving cycles based on a mathematical model of the vehicle's longitudinal dynamics and a simulation model developed by the authors;

A control algorithm for the regenerative braking system was developed, based on the distribution of braking forces between the friction and regenerative systems in small electric vehicles;

The main factors influencing the amount of energy generated during regenerative braking have been identified;

A methodology for experimentally evaluating the accuracy of the simulation model of the vehicle's longitudinal dynamics by comparing it with the results of field tests has been established;

Reliability of the research results.

The research findings are supported by experiments, the use of modern methods, and a theoretical justification of operating parameters and modes based on the principles of theoretical mechanics and advanced mathematics. The experimental data are processed using mathematical and statistical methods. The fact that the research results are applicable in both scientific laboratories and design centers explain their mutual suitability.

Scientific and practical significance of the research results.

The results of this study can be used to demonstrate the scientific significance of regenerative braking in electric vehicles.

The practical significance of the study's results is substantiated by the adaptive control algorithm developed for the regenerative braking system of electric passenger cars. Furthermore, the practical significance of this study contributes to reducing harmful exhaust emissions and improving the vehicle's energy efficiency by recovering a portion of the vehicle's kinetic energy during braking.

Implementation of the research results. Based on the results obtained in justifying the efficiency of recuperative braking for an electrically driven passenger car:

substantiation of the main factors affecting the amount of renewable energy in the braking process of a small-class electric drive vehicle was implemented at "BYD Uzbekistan Factory" LLC (Certificate of "Uzavtosanoat" JSC No. 20/04-25-1029 dated June 23, 2026). As a result, it was shown that these factors can increase the volume of returned energy by up to 35 percent.

an algorithm for controlling the regenerative braking system, allowing for an increase in the volume of renewable energy in small-class electric drive vehicles, has been implemented at "BYD Uzbekistan Factory" LLC ("Uzavtosanoat" JSC dated June 23, 2026, No. 20/04-25-1029). Its use allows for savings of up to 550,000 soums on a small category vehicle equipped with a single electric drive.

the value of the electric drive position (front and rear gears) to increase energy efficiency during braking has been implemented at "BYD Uzbekistan Factory" LLC ("Uzavtosanoat" JSC dated June 23, 2026, No. 20/04-25-1029). As a result, front-wheel drive vehicles have the opportunity to restore energy by 33-35% during the recovery process depending on the driving cycle.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, findings, a bibliography, and an appendix. The total length of the dissertation is 120 pages.

THE MAIN CONTENT OF THE DISSERTATION

The **introduction** justifies the relevance and necessity of the research conducted, sets out the study's goal and objectives, and describes the object and subject of the work. It demonstrates how the topic aligns with the priority areas of science and technology development in the Republic of Uzbekistan. The scientific novelty and practical results of the research are outlined, and the theoretical and applied significance of the conclusions drawn are explained. Information is provided

on the practical application of the research results, data on the testing of the work, published scientific papers, and the structure of the dissertation.

The first chapter of the dissertation, titled **“A Systematic Analysis of the Current State of Environmental Safety in Motor Vehicle Transportation”**, presents an in-depth analysis of the evolution of braking systems in passenger cars. It provides an overview of standards for braking systems. The issue of control algorithms for regenerative braking was examined in detail. This chapter presents a scientific review of current trends in regenerative braking control modes. Each of the existing modes is described in terms of its operating principle, advantages, and disadvantages, as well as possible limitations. Based on this analysis, the purpose and objectives of the scientific research are justified.

The second chapter of the dissertation, titled **“Mathematical Model of the Longitudinal Dynamics of a Vehicle and Its Propulsion System with an Energy Source”**, describes a mathematical model of the longitudinal motion of an electric passenger car. In addition, a simulation model in the MATLAB/Simulink software package is presented to evaluate the energy efficiency of regenerative braking under various braking modes and on various standardized driving cycles. A forward model of an electric passenger car was used as the base model.

The third chapter, titled **“Practical Studies of Regenerative Braking in an Electric Passenger Car”**, describes road and test track tests of an electric passenger car, as well as the configuration and capabilities of the measurement equipment used to record regenerative braking parameters and evaluate the reliability of the experimental data obtained.

To record the parameters of the powertrain and the traction battery, the SmartSafe P01 intelligent diagnostic system was used, which is a specialized diagnostic suite for electric and hybrid vehicles based on a tablet PC with a remote interface module.

The fourth chapter, called **“Calculation of the Economic Benefits of Regenerative Braking”** presents calculations of the electrical energy savings achieved by partially returning kinetic energy to the electric vehicle’s battery during braking.

Small class electric vehicles are particularly popular among taxi drivers and delivery workers, whose daily mileage can reach 150–300 km, which significantly exceeds the mileage typical of regular personal use. Since the amount of energy recovered is directly proportional to mileage, the economic benefit for this category of users increases exponentially. According to calculations, under intensive use with an annual mileage of approximately 45,000–90,000 km (about 150–300 km per day over 300 working days), the annual amount of recovered energy using the proposed algorithm is approximately 304–609 kWh, which corresponds to savings of about 274,000–548,000 sum per year per vehicle; at the same time, the direct contribution of the proposed algorithm compared to the standard one is about 68,500–137,000 sum per year.

CONCLUSIONS

As a result of the research conducted as part of a dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Engineering Sciences on the topic “Justification of the Effectiveness of Regenerative Braking in Electric Passenger Cars,” the following conclusions were drawn:

1. Based on an analysis of the current state of the art, a classification of regenerative braking strategies (parallel and serial) and control algorithms (PID controllers, nonlinear and adaptive controllers, fuzzy logic-based controllers, machine learning, integrated with ABS/ESC systems) was carried out, along with an assessment of their applicability to small-class electric vehicles. It has been established that the justification for regenerative braking in budget rear-wheel-drive electric passenger cars has not been sufficiently studied, and it has been shown that a parallel strategy with optimized distribution of braking forces is the most rational approach for electric vehicles.

2. A mathematical model of the longitudinal dynamics of an electric vehicle with an electric motor was used; based on this model, calculations of energy consumption and recovery were performed for the standardized driving cycles NEDC, WLTC, and CLTC. Using the proposed algorithm, energy consumption amounted to 0.82 kWh (NEDC, 11.02 km), 2.11 kWh (WLTC, 23.66 km), and 1.07 kWh (CLTC, 14.7 km), while the amount of recovered energy was 0.060, 0.16, and 0.089 kWh, respectively, corresponding to a recovery rate of 7.36%, 7.62%, and 8.38% of the energy consumed.

3. A simulation model of the longitudinal motion of a passenger electric vehicle was created in MATLAB/Simulink for front-wheel-drive and rear-wheel-drive configurations. It was found that the front-wheel-drive configuration provides a higher level of energy recovery than the rear-wheel-drive configuration (the proportion of recovered energy in the WLTC cycle is 6.82% versus 5.73%, and in the CLTC cycle, 7.62% versus 6.35%). The developed regenerative braking control algorithm, based on redistributing braking forces between the friction and regenerative systems, increases the amount of recovered energy by 32–35% compared to the stock system (by 35% in the NEDC, 33% in WLTC, and 32% in CLTC), raising the proportion of recovered energy to 8.38% in the CLTC cycle.

4. The main variables affecting the amount of energy recovered have been identified and ranked: driving cycle characteristics, drive topology, initial battery charge level, the efficiency of the electric motor and inverter, the battery's acceptance capacity and BMS software, the distribution of loads across the axles and traction, and the braking blending algorithm. It was found that the initial state of charge is a critical factor: at a level close to 100%, regenerative braking is blocked by the battery management system until the SOC drops below 95%; therefore, it is recommended not to charge the battery beyond 95%.

5. Experimental studies with the regenerative braking system both enabled and disabled (track tests at fixed speeds and a series of 30 urban runs in the morning and afternoon) confirmed the validity of the developed model: the average absolute percentage error in current at the test track did not exceed 4.55%; in urban cycles,

the normalized root mean square error in current was 4.79–5.02%; the MAPE for voltage was 3.53–3.64%, and for state of charge it was 1.26–1.27%, with a coefficient of variation of 10–19% and narrow confidence intervals (Student's t-test, 0.95 confidence level). The actual energy values in the city were measured experimentally (Table 3.9): 0.128 and 0.132 kWh were recovered at energy consumption rates of 2.20 and 2.10 kWh, respectively, corresponding to recovery rates of 5.82% and 6.28%, which are consistent with the calculated recovery rate for the WLTC cycle.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Asanov S.E., Umerov F. On adaptive control of electric vehicles considering operating conditions // International Multidisciplinary Journal for Research and Development (ISSN: 2394-6334), SJIF = 7.805. – 2026. – P. 95–101.
2. Asanov S.E. Predictive maintenance framework for electric bus braking systems based on regenerative braking data analytics // The American Journal of Engineering and Technology. – 2025. – №7-12. – P. 65–72. (05.00.00; №35 (CrossRef), №40 (ResearchGate)).
3. Asanov S.E. Data-driven approach to define mathematical model of a permanent-magnet synchronous motor used in small class electric vehicles // Texas Journal of Engineering and Technology. – 2025 (20.02.2025). – Vol. 41. – P. 1–7. (05.00.00; №14 (ResearchBib), №35 (CrossRef)).
4. Asanov S.E. A data-driven approach to define a mathematical model of the traction battery used in small class electric vehicles // ACTA of Turin Polytechnic University in Tashkent (ВЕСТНИК). – 2023 (опубл. 30.12.2024). – №2-14. – P. 52–56. (05.00.00; №25).
5. Asanov S.E., Umerov F.Sh. Dynamic multicriteria analysis development of the electric vehicle market and their infrastructure in Uzbekistan // ACTA of Turin Polytechnic University in Tashkent (ВЕСТНИК). – 2023 (30.11.2023). – №13(3). – P. 51–55. (05.00.00; №25).
6. Asanov S.E. Critical overview of charging ports used in modern electric vehicles // ACTA of Turin Polytechnic University in Tashkent (ВЕСТНИК). – 2023. – №4-13. – P. 32–38. (05.00.00; №25).
7. Asanov S.E., Umerov F.Sh. Classification of batteries used in battery electric vehicles (BEV) and hybrid electric vehicles (HEV) // Научный журнал “Механика и технология”, Наманганский инженерно-строительный институт. – 2023. – №2. – С. 237–246. (05.00.00).
8. Asanov S.E., Inoyatkhodjaev J., Umerov F. Method for sizing an electric drive of small class electric vehicles // Universum: технические науки (электронный научный журнал). – 2023. – №4(109). (02.00.00; №1).
9. Asanov S.E., Umerov F.Sh., Nurullaev B.D. Justification of performance indicators of small-class electric vehicles and their traction batteries // ACTA of Turin Polytechnic University in Tashkent (ВЕСТНИК). – 2022. – Vol. 30, №12(3). – P. 62–71. (05.00.00; №25).
10. Asanov S.E., Inoyatkhodjaev J.Sh., Umerov F.Sh. Prospects for the development of electric vehicles in Uzbekistan // ACTA of Turin Polytechnic University in Tashkent (ВЕСТНИК). – 2022. – Vol. 30, №2. – P. 65–68. (05.00.00; №25).

11. Asanov S.E. On the parameters influencing the brake pedal “feel” in passenger cars // ACTA of Turin Polytechnic University in Tashkent (БЕСТНИК). – 2021. – Vol. 11, №3. – P. 33–36. (05.00.00; №25).

12. Asanov S.E. The stress and deformation analysis of the brake pedal using Finite Elements Method // ACTA of Turin Polytechnic University in Tashkent (БЕСТНИК). – 2021. – Vol. 11, №3. – P. 30–32. (05.00.00; №25).

13. Asanov S.E. Comparative analysis of numerical tools Simulink and Simscape for the analysis of multi-degree of freedom mass-spring-damper systems // ACTA of Turin Polytechnic University in Tashkent (БЕСТНИК). – 2021. – Vol. 11, №2. – P. 21–24. (05.00.00; №25).

II бўлим (II часть; II part)

14. Asanov S.E., Umerov F., Inoyatkhodjaev J., Bekmurodov N., Kodirov B. Influence of powertrain topology (FWD vs RWD) on regenerative braking capabilities in electric vehicles // Vibroengineering Procedia. – 2025. – №60. – P. 229–236. (05.00.00; №3 (Scopus)).

15. Asanov S.E., Umerov F.Sh. Алгоритм распределения тормозного крутящего момента для заднеприводных электрифицированных транспортных средств (программа для ЭВМ) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № DGU 56272. – Министерство юстиции Республики Узбекистан, 12.11.2025.

16. Asanov S.E. Comparison between active and passive automotive security systems // International Conference on Advance Research in Humanities, Sciences and Education. – 04.11.2025. – P. 62–68.

17. Asanov S.E., Umerov F. On dynamics of EV/HEV market development in Uzbekistan // International Conference “Emerging Trends and Challenges in Sustainable Transportation”, Turin Polytechnic University in Tashkent. – 15–16.09.2025. – P. 27–33.

18. Asanov S.E., Umerov F., Daminov O., Komiljonov U., Avazov I. Energy savings in public transport: estimating the impact of regenerative braking in electric buses in public transport of Tashkent // AIP Conference Proceedings (American Institute of Physics). – 2025. – Vol. 3331. – P. 030080-1–9. (05.00.00; №3 (Scopus)).

19. Asanov S.E., Daminov O., Khakimov J., Yangibaev A., Umerov F. Validation of performance indicators and theoretical aspects of the use of compressed natural gas (CNG) equipment as a main energy supply source on turbocharged internal combustion engines vehicles // AIP Conference Proceedings (American Institute of Physics). – 2024. – Vol. 3152. – P. 030017-1–8. (05.00.00; №3 (Scopus)).

20. Asanov S.E., Umerov F. The use of V2L technology in modern electric vehicles // Xalqaro miqyosdagi ilmiy va ilmiy-texnik anjuman “Mashinasozlikda fan, ta’lim va ishlab chiqarishning integratsiyasi: tendensiyalar, muammolar va yechimlar”. – Toshkent: TDTU, 2024. – B. 421–422.

21. Asanov S.E., Umerov F. On lane-keeping assistance in modern vehicles // Xalqaro miqyosdagi ilmiy va ilmiy-texnik anjuman “Mashinasozlikda fan, ta’lim va ishlab chiqarishning integratsiyasi: tendensiyalar, muammolar va yechimlar”. – Toshkent: TDTU, 2024. – B. 425–426.
22. Asanov S.E., Umerov F. Classification of regenerative braking systems used in vehicles // Xalqaro ilmiy-texnikaviy anjuman “Transportda resurs tejamkor texnologiyalar”. – Toshkent: TDTU, 2023. – B. 137–139.
23. Asanov S.E. Classification of parallel hybrid electric vehicles based on the degree of electrification // International Conference on Learning and Teaching. – 2022. – Issue 9. – P. 67–70.
24. Asanov S.E. Classification of parallel hybrid electric vehicles based on the position of the electric powertrain // Research and Education: Multidisciplinary Scientific Journal (ISSN: 2181-3191). – 2022. – Vol. 1, Issue 1. – P. 95–99.
25. Asanov S.E. Strategies for controlling regenerative braking used in hybrid electric vehicles // International Conference on Learning and Teaching. – 2022. – Issue 1. – P. 285–289.
26. Asanov S.E. Development of the model of the active brake pedal force simulator based on electric drive using SolidWorks // International Conference on Learning and Teaching. – 2022. – Issue 1. – P. 290–294.
27. Asanov S.E. Review of brake pedal feedback simulators // Zamonaviy tadqiqotlar, innovatsiyalar, texnika va texnologiyalarning dolzarb muammolari va rivojlanish tendensiyalari. – Jizzax: JizPI, 2021. – B. 220–222.

Avtoreferat «ACTA TTPU» jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazilib, o'zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o'zaro muvofiqlashtirildi.

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bosishga ruxsat etildi: 16.10.2026

Bichimi: 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» garniturası.

Raqamli bosma usulda bosildi.

Shartli bosma tabog'i: 4. Adadi 100 dona. Buyurtma № 57/26.

Guvohnoma № 851684.

«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Alisher Navoiy ko'chasi, 36 uy.

Tel: +99894-600-44-07

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/T4296 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent shahridagi Turin politexnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezюме)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.turin.uz) ba «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: Inoyatxodjayev Jamshid Shuxratullayevich
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: Alimuxamedov Shavkat Pirmuxamedovich
texnika fanlari doktori, professor

Mirzaliyev Sanjar Mahamadjon o'gli
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot: Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat
texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/2026.10.04.T.46.02 raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil «02» 11 soat 16⁰⁰ da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100095, Toshkent sh, Kichik Xalqa Yo'li, 17-uy, Tel.: (99871) 203-07-77, e-mail: info@polito.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent shahridagi Turin politexnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 126 raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100095, Toshkent sh, Kichik Xalqa Yo'li, 17-uy. Tel.: (99871) 203-07-77, e-mail: info@polito.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil «20» 10 kuni tarqatildi.
(2026-yil «02» 09 da 11 - raqamli reestr bayonnomasi).



O.A.To'ychiyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash raisi, t.f.d., dotsent

J.J.Karimov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash kotibi, f-m.f.f.d., dotsent

S.K.Ro'zimov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash qoshidagi ilmiy seminar
raisi, t.f.d., dotsent

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda avtomobil ishlab chiqaruvchilar atrof-muhitga yetkaziladigan zararni kamaytirish uchun yanada ekologik toza transport vositalarini ishlab chiqish va ishlab chiqarishga katta e'tibor qaratmoqdalar. Bugungi kunda avtomobilsozlikni rivojlantirishning asosiy omillaridan biri elektr dvigatelli avtomobillardan foydalanishda energiyadan oqilona foydalanish va atrof-muhitni muhofaza qilishni ta'minlaydigan texnologiyalarni joriy etishdir. Shu munosabat bilan, energiya tejash darajasini oshirishga qaratilgan eng samarali tizimlardan biri gibrid elektromobillar va elektromobillardagi rekuperatsiya tizimidir. Shu sababli, energiya tejamkorlik darajasini oshirishga qaratilgan eng samarali tizimlardan biri gibrid elektromobillar va elektrokarlarda rekuperatsiya tizimi hisoblanadi. Ushbu tadqiqot elektr yuritma bilan jihozlangan transport vositalarida rekuperativ tormozlash (RT) nazariyasidan foydalangan holda muammoni tadqiq qilish va qisman hal qilishga yordam berishi bilan dolzarb hisoblanadi. Ushbu texnologiyadan foydalanish elektrlashtirilgan transport vositasining tortish akkumulyator batareyasiga sarflangan elektr energiyasining 25% gacha qismini qaytarish imkonini beradi.

Jahonda hozirgi vaqtda yirik avtomobil ishlab chiqaruvchilari avtomobilning klassik gidravlik tormoz tizimi va elektr yuritmasining rekuperativ tizimi o'rtasida tormozlash kuchini taqsimlash algoritmlarini ishlab chiqish orqali yoqilg'i tejamkorligini yaxshilash, shuningdek, zararli chiqindi gazlar miqdorini kamaytirish uchun yechimlarni topishga qaratilgan tadqiqotlarga katta e'tibor qaratmoqdalar. Jahon avtotransport vositalari bozorida tormozlash jarayonida avtomobil kinetik energiyasining bir qismini elektr energiyasiga aylantirish orqali o'zining tortish akkumulyator batareyalarini zaryadlash qobiliyatiga ega bo'lgan elektromobillar va gibrid elektromobillar alohida ahamiyatga ega.

Respublikamizda tabiiy xomashyo resurslaridan foydalanishda energiya tejamkorlik talablariga rioya qilishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Yuqoridagi talablarni bosqichma-bosqich amalga oshirish maqsadida 2022–2026-yillarda O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi¹ ishlab chiqilgan bo'lib, unda ishlab chiqarishda energiya tejovchi texnologiyalarni keng joriy etish, iqtisodiyotda energiya va resurslar sarfini kamaytirish zarurligi ta'kidlangan. Shu munosabat bilan, elektr yuritmalari transport vositalarini ishlab chiqish va ishlab chiqarish sohasida zamonaviy elektrlashtirilgan transport vositalariga joriy etiladigan energiya tejovchi va energiya samaradorligini oshiruvchi texnologiyalarni chuqur o'rganish zarurati tobora ortib bormoqda. Elektr transport vositalarining ekspluatatsion samaradorligi nafaqat tortish elektr yuritmasining texnik ko'rsatkichlari, balki harakat davomida hosil bo'ladigan kinetik energiyadan qanchalik samarali foydalanilishiga ham bevosita bog'liq. Shu nuqtai nazardan, tormozlash jarayonida transport vositasining kinetik energiyasini elektr energiyasiga aylantirib, uni tortish batareyasida qayta saqlash imkonini

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "Respublikani yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni (www.lex.uz)

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2023.4.PhD/T4296.

Диссертация выполнена в Туринском политехническом университете в городе Ташкенте. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.turin.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» («www.ziynet.uz»).

Научный руководитель: Иноятходжаев Жамшид Шухратуллаевич
доктор технических наук, профессор

Rasmiy opponentlar Алимухамедов Шавкат Пирмузамедович
Доктор технических наук, профессор

Мирзалиев Санжар Махаматжон угли
Доктор философии по техническим наукам,
доцент

Yetakchi tashkilot: Ташкентский государственный технический
университет имени И.А. Каримова

Защита диссертации состоится «02» 11 2026 года в 16⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/2026.10.04.T.46.02 при Туринском политехническом университете в городе Ташкенте (Адрес: 100095, г. Ташкент, Малая кольцевая улица, 17. Тел.: (99871) 203-07-77, e-mail: info@polto.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Туринского политехнического университета в городе Ташкенте (зарегистрирована под номером 125). (Адрес: 100095, г. Ташкент, Малая кольцевая улица, 17. Тел.: (99871) 203-07-77, e-mail: info@polto.uz).

Автореферат диссертации разослан «20» 10 2026 года.
(реестр Протокола рассылки № 1 от «02» 09 2026 года).



О.А.Туйчиев
Председатель Научного совета по
присуждению учёных степеней, д.т.н., доцент

Ж.Ж.Каримов
Ученый секретарь Научного совета по
присуждению учёных степеней, д.ф.ф.-м.н., доцент

С.К.Рузимов
Председатель Научного семинара при Научном
совете по присуждению учёных степеней,
д.т.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и значимость темы диссертации. Автопроизводители во всем мире уделяют большое внимание разработке и производству более экологически чистого транспорта для уменьшения ущерба, наносимого окружающей среде. Сегодня одним из ключевых факторов развития автомобилестроения является внедрение технологий, которые обеспечивают рациональное использование энергии и охрану окружающей среды при использовании автомобилей с электродвигателями. В этой связи одной из наиболее эффективных систем, направленных на повышение уровня энергосбережения, является система рекуперации в гибридных электромобилях и электрокарах. По этой причине, одной из наиболее эффективных систем, направленных на повышение уровня энергосбережения, является система рекуперации в гибридных электромобилях и электрокарах. Данное исследование имеет актуальность, так как оно помогает исследовать и частично решать проблему, используя теорию рекуперативного торможения (РТ) в транспортных средствах, которые оснащены электрическим приводом. Использование данной технологии позволяет вернуть до 25% истраченной электрической энергии в тяговую аккумуляторную батарею электрифицированного транспортного средства.

В мире на данный момент крупнейшие автопроизводители прикладывают огромные усилия и уделяют пристальное внимание исследованиям, акцентированным на нахождение решений для уменьшения количества вредных выхлопных газов, а также улучшение топливной экономичности путем разработки алгоритмов для распределения тормозного усилия между классической гидравлической тормозной системой и рекуперативной системой электрического привода автомобиля. Особое значение на мировом рынке автотранспортных средств занимают электромобили и гибридные электромобили, способные заряжать свои тяговые аккумуляторные батареи в процессе торможения за счёт преобразования части кинетической энергии автомобиля в электрическую энергию.

В нашей Республике отдельное внимание уделяется следованию требований энергоэффективности при использовании сырьевых природных ресурсов. С целью поэтапного внедрения вышеуказанных требований была разработана Стратегия действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2022–2026 годы¹, в которой подчеркивается острая необходимость в повсеместном внедрении энергосберегающих технологий в производстве и снижении потребления энергии и ресурсов в экономике. В этой связи в сфере разработки и производстве транспортных средств с электрическим приводом предопределяется необходимость изучения

¹ Указ Прехидента Республики Узбекистан №УП-60 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики» от 28.01.2022 (www.lex.uz)

The theme of Doctor of Philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan on the № B2023.4.PhD/T4296.

The dissertation was completed at the Turin polytechnic university in Tashkent.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council (www.turin.uz) and on the website of Information-educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: Inoyatkhodjaev Jamshid Shukhratullayevich
doctor of technical sciences, professor

Official opponents: Alimuxamedov Shavkat Pirmuxamedovich
doctor of technical sciences, professor

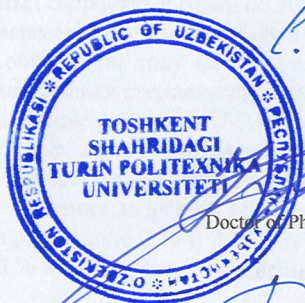
Mirzaliev Sanjar Mahamadjon ugli
doctor of philosophy in technical sciences, docent

Leading organization: Tashkent state technical university
named after I.A.Karimov

The defense of the will take place on "02" 11 2026 at 16⁰⁰ at the Scientific council No. PHD.03/2026.10.04.T.46.02 at the Turin polytechnic university in Tashkent (Address: 100095, Tashkent city, Little Ring Road, 17. Phone: (+99871) 203-07-77; e-mail: info@polito.uz)

The dissertation is registered in Information Resource Centre of the Turin polytechnic university in Tashkent (is registered number № 1/26). (Address: 100095, Tashkent city, Little Ring Road, 17. Phone: (+99871) 203-07-77; e-mail: info@polito.uz)

The abstract of the dissertation was distributed on "20" 10 2026 y.
(Protocol at the register. № 1 on "02" 09 2026 y.).



O.A.Tuychiev
Chairman of the Scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, associate professor

J.J.Karimov
Scientific secretary of Scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Philosophy in physics-mathematics, associate professor

S.K.Ruzimov
Chairman of the academic seminar under
The Scientific council awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, associate professor

DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON THE TECHNICAL SCIENCES

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Research compliance with the priorities of the republic's science and technology development. This research is part III of republican science and technology development. It was carried out within the priority direction "Energy, energy - resource efficiency, transport, machinery and equipment construction".

The purpose of this study is to demonstrate the effectiveness of regenerative braking in an electric passenger car, which enables high levels of energy efficiency and environmental safety while meeting dynamic performance requirements.

Tasks of the research:

a review of current developments and research on modern regenerative braking systems in electric vehicles;

the use of a mathematical model of a vehicle with an electric motor, which allows for the calculation of electrical energy consumption while the vehicle is operating on standardized driving cycles using a regenerative braking system;

developing a simulation model using MATLAB/Simulink for the longitudinal motion of an electric passenger car on various driving cycles with the regenerative braking system enabled for both front-wheel-drive and rear-wheel-drive vehicles;

identification of the main variables affecting the amount of energy generated by the regenerative braking system in electric vehicles;

experimental study to evaluate the reliability of the developed simulation model of the longitudinal motion of an electric vehicle;

The object of research is a small-class passenger car with electric rear-wheel drive.

The subject of research is the electric drive and its associated electronic control systems.

Research methods. The study involved reviewing and synthesizing theoretical and experimental work on the use of regenerative braking systems in electric passenger cars, methods for calculating a vehicle's longitudinal dynamics and energy efficiency, experimental methods, nonlinear regression analysis, simulation modeling methods, and mathematical statistics.

The scientific novelty of the research is as follows:

Energy efficiency has been improved by up to 35% for small electric vehicles during driving cycles based on a mathematical model of the vehicle's longitudinal dynamics and a simulation model developed by the authors;

A control algorithm for the regenerative braking system was developed, based on the distribution of braking forces between the friction and regenerative systems in small electric vehicles;

The main factors influencing the amount of energy generated during regenerative braking have been identified;

A methodology for experimentally evaluating the accuracy of the simulation model of the vehicle's longitudinal dynamics by comparing it with the results of field tests has been established;