



MECHANICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF TRAIN RESISTANCE AND ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION ON UZBEKISTAN RAILWAYS

Lesov Altynbek Talgat ugli¹

Otegenov Farhad Maksetbay ugli²

¹Doctor of Technical Sciences (PhD), Acting Associate Professor,
Department of "Electric Rolling Stock"

²Master's student of the Department of "Electric Rolling Stock"
Tashkent State Transport University, Uzbekistan, Tashkent

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17660161>

ARTICLE INFO

Received: 12th November 2025

Accepted: 19th November 2025

Online: 20th November 2025

KEYWORDS

Railway transport; traction electricity, energy consumption, motion resistance, Davis formula, slope, track curves, route geometry, electric rolling stock, modeling, traction force, energy efficiency.

ABSTRACT

The article examines the integration of factors influencing traction electricity consumption with route geometry and characteristics of Uzbekistan's railway electric rolling stock. It provides an overview of motion resistance modeling methods, including Davis formulas and accounting for slopes and curves. A model calibration approach is proposed, allowing for more accurate calculation of traction forces, equilibrium speed, and train energy consumption. The obtained results can be used to improve energy efficiency and optimize railway infrastructure operations.

МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЕЗДОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УЗБЕКИСТАНА

Лесов Алтынбек Талгат угли¹

Отегенов Фархад Максетбай улы²

¹доктор (PhD) технических наук, и.о. доцент, кафедры "Электроподвижной состав"

²магистрант кафедры "Электроподвижной состав"

Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, Ташкент

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17660161>

ARTICLE INFO

Received: 12th November 2025

Accepted: 19th November 2025

Online: 20th November 2025

KEYWORDS

Железнодорожный транспорт; тяговая электроэнергия, энергопотребление, сопротивление движению, формула Дэвиса, уклон, кривые пути, геометрия

ABSTRACT

В статье рассматривается интеграция факторов, влияющих на потребление тяговой электроэнергии, с геометрией маршрута и характеристиками электроподвижного состава железных дорог Узбекистана. Приведен обзор методов моделирования сопротивления движению, включая формулы Дэвиса и учет уклонов и кривых. Предложен подход к калибровке моделей, позволяющий точнее рассчитывать тяговые усилия, равновесную скорость и энергопотребление поездов. Полученные



маршрута,
электроподвижной состав,
моделирование, тяговое
усилие,
энергоэффективность.

результаты могут быть использованы для
повышения энергоэффективности и оптимизации
работы железнодорожной инфраструктуры.

O'ZBEKISTON TEMIR YO'LLARIDA POYEZDLAR QARSHILIGINI MEXANIK-MATEMATIK MODELLASHTIRISH VA ENERGIYA SARFINI OPTIMALLASHTIRISH

Lesov Altinbek Talg'at o'g'li¹

Otegenov Farxad Maksetbay uli²

¹Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), "Elektr harakat tarkibi" kafedrası dotsenti v.b.

²"Elektr harakat tarkibi" kafedrası magistranti

Toshkent davlat transport universiteti, O'zbekiston, Toshkent

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17660161>

ARTICLE INFO

Received: 12th November 2025

Accepted: 19th November 2025

Online: 20th November 2025

KEYWORDS

Temir yo'l transporti; tortuvchi
elektr energiyasi, energiya sarfi,
harakatga qarshilik, Devis
formulasi, nishablik, yo'l egri
chiziqlari, marshrut
geometriyasi, elektr
harakatlanuvchi tarkib,
modellashtirish, tortish kuchi,
energiya samaradorligi.

ABSTRACT

Maqolada O'zbekiston temir yo'llari elektr harakatlanuvchi tarkibining yo'nalish geometriyasi va xususiyatlari bilan tortuvchi elektr energiyasi iste'moliga ta'sir etuvchi omillarning uyg'unlashuvi ko'rib chiqilgan. Harakatga qarshilikni modellashtirish usullari, jumladan, Devis formulalari hamda nishabliklar va egri chiziqlarni hisobga olish bo'yicha sharh berilgan. Poyezdlarning tortish kuchi, muvozanat tezligi va energiya sarfini aniqroq hisoblash imkonini beruvchi modellarni kalibrlash yondashuvi taklif etilgan. Olingan natijalar energiya samaradorligini oshirish va temir yo'l infratuzilmasi faoliyatini optimallashtirish uchun qo'llanilishi mumkin.

Temir yo'l transporti (temir yo'l tashuvlari) samaradorligi barqaror rivojlanish tizimlarining (BRT) eng muhim ustunlaridan biri hisoblanadi. Shu bois, O'zbekiston Respublikasidagi elektrovozlar va elektropoyezdlarning yo'l geometriyasi xususiyatlari bilan tortuvchi elektr energiyasi (TE) iste'moli omillarini uyg'unlashtirish hal qiluvchi ahamiyatga ega. Shu bilan birga, temir yo'l transporti milliy iqtisodiyotning eng muhim tarmoqlaridan biri bo'lib, iqtisodiy o'sishga hissa qo'shadi. O'zbekiston sharoitida temir yo'l tashuvlari alohida ahamiyat kasb etadi, chunki mamlakat dengizga chiqish imkoniyatiga ega emas va asosan quruqlikdagi transport turlariga tayanadi. Respublika temir yo'l tarmog'i Markaziy Osiyoda eng rivojlangan tarmoqlardan biri sifatida sanoat hududlari, transport tugunlari va tashqi savdo yo'laklari o'rtasida barqaror aloqani ta'minlaydi hamda bir qator strategik vazifalarni hal etadi: avtomobil magistrallarini



yuksizlantirish, karbonat angidrid chiqindilarini kamaytirish, mamlakatning tranzit salohiyatini oshirish va O'zbekistonning xalqaro transport tarmoqlariga qo'shilishi uchun sharoit yaratish.

Harakatlanayotgan poyezdga ta'sir etuvchi kuchlarni aniq o'lchash masalasi bir asr oldin ko'tarilgan edi. Bugungi kunda yanada dolzarb bo'lgan ushbu vazifa butun tarkibning harakatlanishi va unga qarshilik ko'rsatishni aniq ilmiy modellash tirish maqsadini ko'zlaydi. Bu muammoning yechimi har qanday temir yo'l yo'nalishida poyezdning og'irligi, tarkibi, talab etiladigan quvvati, tezligi, yo'l qismlaridan o'tish vaqti va energiya sarfi bo'yicha cheklovlarni hisoblash va baholash imkonini beradi. Hozirgi kunda energiyadan foydalanishni optimallashtirish hamda temir yo'l tarmog'ining mavjudligi va o'tkazuvchanlik qobiliyatini oshirish zarurati vagonlar va lokomotivlarni imitatsion modellash tirish uchun yanada ilmiy mexanik-matematik yondashuvni talab etmoqda. Vagon turlarining, ularning profillarining, turli g'ildirak aravalarining, vagonlarning uzunligi va og'irligining xilma-xilligi harakatga qarshilik va poyezdlar samaradorligini tahlil qilishning murakkab uslubini talab qiladi.

Elektr harakatlanuvchi tarkibning energiya sarfi, ularning tezligi va yo'l harakati ma'lumotlari, shuningdek, yo'llar geometriyasi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlik va monitoring Yan va boshqalar [1], Ferreyr va boshqalar [2], Xaladin [3] tomonidan o'rganilgan. Temir yo'l transportida tortuvchi elektr energiyasi sarfi kontakt tarmog'idan ta'minlanadigan temir yo'llar va elektr harakatlanuvchi tarkibning holatini tavsiflovchi omillar bilan belgilanadi. Bu omillar transport vositalarining harakat tezligiga ta'sir qiladi, bu esa o'z navbatida energiya sarfiga bog'liq. Kontakt tarmog'idan ta'minlanadigan elektr harakatlanuvchi tarkib - bu elektr ta'minoti kontakt tarmog'i (havo kontakt tarmog'i) orqali amalga oshiriladigan transport vositalaridir. Energiya sarfi bir qator omillarga bog'liq bo'lib, ular asosan tortuvchi elektr ta'minoti tizimlarini boshqarishda namoyon bo'ladi.

Ushbu nashrda taqdim etilgan yondashuv tortuvchi elektr energiyasi sarfini belgilovchi omillarning yo'nalish geometriyasi va transport vositasining xususiyatlari bilan o'zaro bog'liqligini kuchaytirishga olib keladi.

Shunga qaramay, yo'nalish geometriyasi va transport vositasining xususiyatlarini o'rganish bo'yicha ilmiy tadqiqotlarga qo'yiladigan talablar murakkab va mehnat talab qiluvchi bo'lib, ekspert bilimlarini va ko'plab asboblarni talab etadi. Shuningdek, to'g'ridan-to'g'ri o'lchash usullari (DMM), bilvosita o'lchash usullari (IMM) va ekspert usullarini (EM) aqliy hujum (BM), intellektual xaritalar tuzish (MMM), tizimli yondashuv (SAM), evristik yondashuv (HM) va nosozliklar turlari va oqibatlarini tahlil qilish (FMEA) usullari bilan integratsiyalashni talab qiladi.

Poyezdlar qarshiligini modellash tirish sohasida keng ko'lamli tadqiqotlar o'tkazildi, tajribalar amalga oshirildi va nazariy yechimlar ishlab chiqildi. 1910-yilda Shmidt va 1913-yilda Shtral empirik ma'lumotlarga asoslangan holda poyezdlarning umumiy qarshiligini hisoblash uchun bir qator formulalarni ishlab chiqishni boshladilar. 1926-yilda Devis [4] o'z tadqiqotlari natijalarini e'lon qildi. U tezlikka nisbatan ikkinchi darajali ko'phadlar formulasidan foydalanishni taklif etdi. Bu harakat qarshiligini hisoblash uchun yetarli aniqlikni ta'minladi. Keng qo'llaniladigan formula odatda quyidagicha ifodalanadi:



$$F_R = A + BV + CV^2 \quad (1)$$

Harakatga tabiiy qarshilik kuchi F_R (to'g'ri va gorizontallarda) tezlikka bog'liq (bu yerda V - tezlik, m/s) bo'lib, u mutlaq kattaliklarda nyutonlarda yoki mingga nisbatan solishtirma qarshilik sifatida ifodalanishi mumkin, ya'ni [kg/tonna] yoki [kN/N]. A , B va C koeffitsiyentlari transport vositalariga xos bo'lib, vagon turi, aravachasi, ko'ndalang kesimi, massasi va boshqa omillarga qarab o'zgaradi. Buning ko'plab variantlari mavjud bo'lib, ular modifikatsiyalangan Devis tenglamalari deb ataladi [4].

Harakatlanayotgan poyezdga ta'sir etuvchi umumiy qarshilikni hisoblash uchun qiyalikdan kelib chiqadigan qo'shimcha qarshilik va egri chiziqlardan hosil bo'ladigan qarshilikni ham hisobga olish zarur.

Batafsil tushuntirishlar Ivnititskiy [5] va Lindal [6] tomonidan chop etilgan. Kuchlarni tabiatiga ko'ra mexanik ishqalanish, aerodinamik qarshilik va havo turbulentligi sifatida tasniflash mumkin. Qarshilik kuchlarini aniqlash usullarini murakkablik darajasi bo'yicha quyidagicha sanab o'tish mumkin: kuzatish, taqqoslash, to'xtash tajribalari, vagon-dinamometr, bort nazorati va qayd etish tizimlari (OTMR) yozuvlari, fizik o'lchovlar, tajribalar va haqiqiy poyezdlarda takroriy sinovlar.

Umumiy qarshilik formulasini quyidagicha yozish mumkin:

$$F_{TR} = A + BV + CV^2 + F_C + F_G \quad (2)$$

bu yerda

A - arava konstruksiyasi, o'q yuklanishi hamda o'ziga xos mexanik ishqalanishga bog'liq bo'lgan statik va dinamik qarshilik [N];

B - rels va g'ildirak orasidagi reborda ishqalanishi, osma dempferlanishi, shuningdek, havoning nokvadratlik qarshiligi va ishqalanishning bir qismi, masalan, havo impulsi [N·s/m];

C - poyezdning old va orqa qismidagi, tunnellardagi aerodinamik qarshilik, B [N·s²/m²] qo'shiluvchida hisobga olinmagan qo'shimcha turbulentlik ta'siri;

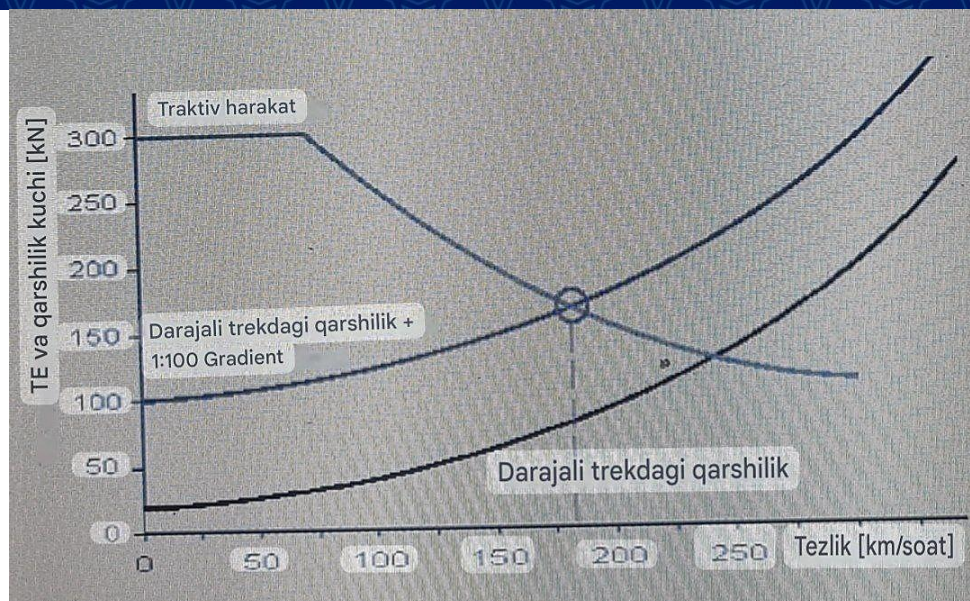
V - atrofdagi shamol tezligi hisobiga qo'shimcha oshirilishi mumkin bo'lgan poyezd tezligi [m/s];

F_C - egilgan relslarda sirpanish, krip va ishqalanish natijasida g'ildirak va relsning tutashish chegarasida energiya tarqalishi tufayli egri chiziqlardagi qarshilik [N];

F_G - temir yo'l qiyaligi funksiyasi sifatidagi nishab qarshiligi [N]; $TE(v)$ - tezlikka bog'liq bo'lgan lokomotiv(lar)ning tortish kuchi [N].

Lokomotivning tortish kuchi (TE) va umumiy qarshilik orasidagi farqqa asoslanib, poyezd Nyutonning ikkinchi qonuniga muvofiq tezlashadi yoki sekinlashadi.

Har qanday lokomotivning tortish kuchi tezlikka bog'liq bo'lib, uni jadval, grafik yoki formula orqali ifodalash mumkin. Tezyurar poyezd uchun TE ning tezlikka bog'liqligining odatiy diagrammasi quyida keltirilgan. E'tibor beringki, yuqori tezlikda, turbulentlik tufayli havo qarshiligi juda katta bo'lganda, tortish kuchi zaruriy ravishda kichik bo'ladi.



1-rasm. Qarshilik egri chiziqlariga qo'yilgan tezlikka bog'liq tortish kuchi (TK) egri chizig'i namunasi

Temir yo'lining istalgan nuqtasida erishish mumkin bo'lgan maksimal (muvozanat) tezlik umumiy qarshilik egri chizig'i va tortish kuchi grafigining kesishgan nuqtasi bilan aniqlanadi. Agar joriy tezlik muvozanat tezligidan past bo'lsa, poyezd tezlashishi mumkin.

Joriy tezlikni aniqlash jarayoni iterativ bo'lib, u poyezd harakati davomida ma'lum oraliqlar bilan amalga oshiriladi. Temir yo'l infratuzilmasi egrilikdagi qarshilik, qiyalikdagi qarshilik va to'xtash joylari haqidagi ma'lumotlarni o'z ichiga oladi. Marshrut bo'yicha birinchi nuqtani hisoblashda tortish kuchining qiymati qarshilik kuchlari bilan taqqoslanadi. Natijada hosil bo'lgan tezlanish yoki sekinlanish ikkinchi hisobga olish nuqtasigacha bo'lgan masofada qo'llaniladi.

Qiyalik qarshiligi F_G - bu poyezd qiya sirt bo'ylab harakatlanayotganda qiyalikni yengib o'tish uchun zarur bo'lgan kuch hisoblanadi.

F_G egri chiziqlaridagi qarshilik g'ildirak va rels orasidagi kontakt zonasida sirpanish, krip va ishqalanish tufayli energiyaning tarqalishi natijasida yuzaga keladi. Kuch egri yo'l radiusiga teskari proporsionaldir. Yo'lining past sifati va uchma-uch birikmalar egri chiziqlardagi qarshilikni oshirishi mumkin. Harakatning asosiy qarshiligiga o'xshab, egri chiziqlardagi qarshilikni tavsiflovchi bir nechta turli formulalar mavjuddir.

[6] da tavsiflangan eng oddiy, klassik yondashuv faqat yo'lining egriligiga asoslanadi, bunda R radiusi metrlarda o'lchanadi.

$$R_c = \frac{623.7}{R} \quad [\text{kg / tonna}] \quad (3)$$

Ushbu turdagi tenglama haddan tashqari soddalashtirilgandir. Egri chiziqning qarshiligi ko'plab omillarning funksiyasi bo'lgani sababli - egrilik, asos, rels/g'ildirak profillari, ishqalanish modifikatorlari, iz kengligi, arava turi, qattiqlik va boshqalar - bu omillarni hisobga olish uchun yanada mukammalroq formula zarurdir.

Aniq modellashtirish uchun modellarni muayyan vagonlar asosida yaratish tavsiya etiladi. Qarshilik koeffitsiyentlarini belgilash jarayoni haqiqiy sayohatlarning



eksperimental ma'lumotlaridan foydalangan holda sinchkovlik bilan kalibrlashni talab qiladi. Aniq tekshiruvdan so'ng, modellar aralash tarkibli bo'lishi mumkin bo'lgan butun poyezd modelini yaratish uchun ishlatilishi mumkin. So'ngra, bu modeldan kompyuter simulyatsiyasi yordamida aniq unumdorlik ma'lumotlarini olish uchun ma'lum darajada ishonchlilik bilan foydalanish mumkin [7, 8].

References:

1. Yan, X.; Zhang, R.; Ma, J.; Ma, Y. O'zgaruvchan yo'l geometriyasini hisobga olgan holda adaptiv avtomobil tezligini boshqarish. Math. Probl. Eng. 2013, 2013, 617879.
2. Ferreyra, X.; Rodrigues, K.M.; Pino, K. Yo'l geometriyasining transport vositalari energiya sarfi va CO2 chiqindilariga ta'siri: energiya samaradorligini baholash uslubiyati. Energies 2020, 13, 119.
3. Goladin, S. Elektr ta'minoti infratuzilmasiga yuklamani hisobga olgan holda poyezdlar harakatini rejalashtirish muammosi. Amaliy misol. Energetika 2021, 14, 4781.
4. Davis W. J. Jr. Elektrovoz va vagonlarning harakat qarshiligi. General Electric Review, 29-jild, 1926-yil.
5. Iwnicki S., Temir yo'l transporti dinamikasi bo'yicha qo'llanma, Taylor and Francis Group, 2006.
6. Lindahl M., Yuqori tezlikdagi temir yo'llar uchun yo'l geometriyasi, TRITA – FKT hisoboti 2001:54, ISSN 1103 – 470X, 139-143-betlar, KTH Stokgolm 2001.
7. Zalevskiy, V. Ob-havoning elektr energiyasi iste'moli o'zgaruvchanligiga ta'siri. Iqtisodiyot va boshqaruv. 2011, № 3, 195–202-betlar.
8. Duglas, X.; Roberts, K.; Xillmanssen, S.; Shmid, F. Temir yo'l tarmoqlarida tortish energiyasi iste'molini kamaytirish bo'yicha mavjud choralarni baholash. Energy Convers. Manag. 2015, 106, 1149–1165.