



A MODEL FOR ASSESSING THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC ROLLING STOCK BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Izzatillo Rakhmiddinov

Turin Polytechnic University in Tashkent

Abstract. The article proposes a hybrid model for assessing the energy efficiency of electric rolling stock that combines a physical traction energy balance with machine learning. The physical part calculates the reference energy for a given train, track profile and speed from the standard running resistance formulas. The machine-learning part learns from on-board data how actual consumption deviates from this reference. An energy efficiency index is defined as the ratio of reference to actual energy. An illustrative calculation for a 3,192 t train on a 50 km section shows that raising the cruising speed from 50 to 80 km/h cuts running time by 37.5% but increases net energy by 46%. The model is intended for UzEL electric locomotives operated by Uzbekistan Railways and forms the basis of a driver advisory system.

Keywords: electric rolling stock, energy efficiency, traction calculation, artificial intelligence, machine learning, on-board data, driver advisory system.

ELEKTR HAKAKAT TARKIBINING ENERGIYA SAMARADORLIGINI SUN'IY INTELLEKT ASOSIDA BAHOLASH MODELI

Raxmiddinov Izzatillo

Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti

Annotatsiya. Maqolada elektr harakat tarkibining energiya samaradorligini baholash uchun fizik tortish energiyasi balansi va mashinaviy o'qitishni birlashtirgan gibrid model taklif etiladi. Fizik qism berilgan poyezd, yo'l profili va tezlik uchun me'yoriy energiyani asosiy harakatga qarshilik formulalari orqali hisoblaydi. Mashinaviy o'qitish qismi esa haqiqiy sarfning ushbu me'yoriy qiymatdan chetlanishini bort ma'lumotlari asosida o'rganadi. Energiya samaradorligi indeksi me'yoriy va haqiqiy energiya nisbati sifatida aniqlangan. 3192 t massali poyezd uchun 50 km uchastkada bajarilgan namunaviy hisob tezlikni 50 dan 80 km/soatga oshirish yurish vaqtini 37,5 foizga qisqartirib, sof energiya sarfini 46 foizga oshirishini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: elektr harakat tarkibi, energiya samaradorligi, tortish hisobi, sun'iy intellekt, mashinaviy o'qitish, bort ma'lumotlari, mashinistga maslahat tizimi.



Kirish

Temir yo‘l transportida elektr energiyasi xarajatlari ekspluatatsiya xarajatlarining katta qismini tashkil etadi. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 10-oktyabrdagi PQ-329-son qarorida temir yo‘l transportini rivojlantirish, harakat tarkibini yangilash va xizmat sifatini oshirish vazifalari belgilangan [1]. Bu vazifalarni bajarishda elektrovozlarning energiya samaradorligini o‘lchash va boshqarish muhim omil hisoblanadi.

Energiya tejamkor poyezd boshqaruvi nazariyasida tortish, inersiya bilan harakat (vybeg) va tormozlash rejimlarining optimal ketma-ketligi yaxshi o‘rganilgan [2–4]. Ammo amaliyotda bir xil uchastkada bir xil poyezd uchun energiya sarfi mashinist, ob-havo, poyezd massasi va jadvalga qarab sezilarli farq qiladi. Bunday murakkab bog‘liqliklarni faqat fizik formulalar bilan to‘liq ifodalash qiyin, katta hajmdagi bort ma’lumotlari esa mashinaviy o‘qitish uchun qulay manba bo‘ladi [5].

Muallifning avvalgi tadqiqotlarida harakat tarkibining texnik holatiga qarab ta’minlash davrlarini optimallashtirish modellari ishlab chiqilgan [6]. Maxsus o‘ziyurar harakat tarkibi ramasining kuchlanishi harakat tezligiga chiziqli bog‘liq ekani tenzometriya orqali aniqlangan [7]. Ushbu maqolaning maqsadi – shu tajribani elektr harakat tarkibiga ko‘chirib, energiya samaradorligini sun’iy intellekt asosida baholashning gibrid modelini taklif etishdir.

Tadqiqot obyekti va usullari

Tadqiqot obyekti sifatida “O‘zbekiston temir yo‘llari” AJda ekspluatatsiya qilinayotgan UzEL rusumli elektrovozlardan tanlangan. Model ikki qismdan iborat. **Fizik qism** uchastkaning har bir elementi uchun harakatga qarshilik va nishablik kuchlari yig‘indisidan tortish energiyasini hisoblaydi:

$$E_t = (1/\eta) \cdot \Sigma (F_{qarsh,j} + F_{nish,j}) \cdot L_j, \text{ agar } F > 0 \quad (1)$$

bu yerda η – tortish yuritmasining FIK, L_j – yo‘l elementi uzunligi. Agar natijaviy kuch manfiy bo‘lsa, ya’ni poyezd nishablikda tormozlanayotgan bo‘lsa, rekuperativ tormozlashda qaytarilgan energiya η_r koeffitsiyent bilan hisoblanadi. Asosiy solishtirma qarshilik (N/kN) tortish hisoblari qoidalaridagi formulalar bo‘yicha olinadi [8]: elektrovoz uchun (2), to‘rt o‘qli yuklangan vagonlar uchun (3):

$$w_o' = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 \quad (2)$$

$$w_o'' = 0,7 + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) / q_o \quad (3)$$

bu yerda v – tezlik, km/soat; q_o – o‘q yuklamasi, t. Poyezdni to‘xtash joyidan



tezashtirish uchun kinetik energiya ham hisobga olinadi, aylanuvchi massalar koeffitsiyenti 1,06 deb qabul qilinadi. Solishtirma energiya sarfi va energiya samaradorligi indeksi quyidagicha aniqlanadi:

$$e = E_{\text{sof}} \cdot 10^4 / (Q \cdot L), \quad K_e = E_{\text{me'yor}} / E_{\text{haqiqiy}} \quad (4)$$

bu yerda e – $\text{kVt} \cdot \text{soat} / (10^4 \text{ t} \cdot \text{km})$ dagi solishtirma sarf, Q – poyezd massasi, L – uchastka uzunligi. $K_e = 1$ bo'lsa, poyezd me'yoriy rejimda boshqarilgan; $K_e < 1$ bo'lsa, ortiqcha sarf mavjud.

Mashinaviy o'qitish qismi haqiqiy sarf bilan fizik model natijasi orasidagi farqni (qoldiqni) bashorat qiladi. Bunday yondashuvda fizik model asosiy qonuniyatlarni ta'minlaydi, o'qitilgan model esa mashinist uslubi, ob-havo va jihozlar holati kabi omillar ta'sirini o'rganadi. Kirish belgilari 1-jadvalda keltirilgan. Jadval ko'rinishidagi ma'lumotlar uchun gradiyent bustingi va tasodifiy o'rmon usullari tavsiya etiladi [9, 10]. Model sifati aniqlik koeffitsiyenti R^2 va o'rtacha mutlaq foiz xatoligi (MAPE) bilan baholanadi, tekshirish uchun alohida reymlar ajratiladi.

1-jadval. Modelning kirish belgilari

Belgilar guruhi	Belgilar	Manba
Elektr	kontakt tarmog'i kuchlanishi, tortish toki, quvvat	bort tizimi
Harakat	tezlik, tezlanish, tortish va tormoz kuchi, boshqaruv rejimi	bort tizimi
Yo'l	nishablik, egrilik radiusi, tezlik cheklovi	yo'l pasporti
Poyezd	massa, vagonlar soni, o'q yuklamasi	poyezd hujjatlari
Tashqi	havo harorati, shamol	meteoma'lumotlar

Natijalar va ularning muhokamasi

Modelning fizik qismi namunaviy hisob bilan sinab ko'rildi. Hisobda elektrovoz massasi 192 t, vagonlar massasi 3000 t, o'q yuklamasi 23 t, $\eta = 0,85$ va $\eta_r = 0,6$ deb qabul qilindi. Uchastka 50 km uzunlikda bo'lib, beshta 10 km lik elementdan iborat: gorizonta, +4 % ko'tarilish, gorizonta, -4 % nishablik, gorizonta. Poyezd bir marta joyidan qo'zg'aladi. Bu parametrlar usulni ko'rsatish uchun tanlangan va aniq UzEL elektrovozining o'lchangan ko'rsatkichlari emas.



2-jadval. Yurish tezligining energiya sarfi va vaqtga ta'siri (namunaviy hisob)

Tezlik, km/soat	Tortish energiyasi, kVt·soat	Rekuperatsiya, kVt·soat	Sof energiya, kVt·soat	e, kVt·soat/(10 ⁴ t·km)	Yurish vaqti, min
50	1101	134	967	60,6	60,0
60	1221	125	1097	68,7	50,0
70	1360	114	1246	78,1	42,9
80	1517	102	1415	88,6	37,5

Hisob natijalari ko'rsatishicha, tezlikni 50 dan 80 km/soatga oshirish yurish vaqtini 37,5 foizga qisqartiradi, ammo sof energiya sarfini 46 foizga oshiradi. Buning ikki sababi bor. Birinchidan, harakatga qarshilik tezlik kvadratiga bog'liq ravishda o'sadi. Ikkinchidan, yuqori tezlikda nishablikda qaytariladigan energiya kamayadi: 134 dan 102 kVt·soatgacha, chunki nishablik kuchining katta qismi qarshilikni yengishga sarflanadi.

Demak, jadvalda zaxira vaqt bo'lgan uchastkalarda tezlikni pasaytirish eng katta tejamni beradi. Mashinistga maslahat tizimi aynan shu zaxirani aniqlashi kerak: o'qitilgan model har bir uchastka uchun haqiqiy sarfni bashorat qiladi, optimallashtirish bloki esa jadvalga sig'adigan eng tejamkor tezlik va rejimni tanlaydi. Tavsiya kabina displeyida ko'rsatiladi, har bir reysdan keyin esa K_e indeksi hisoblanib, mashinistlar va uchastkalar bo'yicha tahlil qilinadi.

Taklif etilgan modelning cheklovlari ham bor. Namunaviy hisobda yordamchi ehtiyojlar, kontakt tarmog'idagi yo'qotishlar va yo'l profilining real murakkabligi hisobga olinmagan. O'qitilgan modelning aniqligi esa faqat haqiqiy bort ma'lumotlari to'planganidan keyin baholanishi mumkin.

Xulosa

1. Elektr harakat tarkibining energiya samaradorligini baholash uchun fizik tortish balansi va mashinaviy o'qitishni birlashtirgan gibridd model taklif etildi.
2. Energiya samaradorligi indeksi K_e me'yoriy va haqiqiy sarf nisbati sifatida aniqlandi. U turli reyslar, mashinistlar va uchastkalarni bir xil mezon bo'yicha solishtirish imkonini beradi.
3. Namunaviy hisob yurish tezligini 50 dan 80 km/soatga oshirish sof energiya sarfini 46 foizga oshirishini ko'rsatdi. Bu jadvaldagi vaqt zaxirasidan foydalanish muhim tejash manbai ekanini tasdiqlaydi.



4. Keyingi tadqiqotlarda UzEL elektrovotlarining bort ma'lumotlari asosida model o'qitiladi va tekshiriladi, natijada mashinistga maslahat tizimi ishlab chiqiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 10-oktyabrdagi PQ-329-son qarori.
2. Howlett P., Pudney P. Energy-Efficient Train Control. – London: Springer, 1995.
3. Scheepmaker G.M., Goverde R.M.P., Kroon L.G. Review of energy-efficient train control and timetabling // European Journal of Operational Research. – 2017. – Vol. 257, No. 2. – P. 355–376.
4. Yang X., Li X., Ning B., Tang T. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2016. – Vol. 17, No. 1. – P. 2–13.
5. Ghofrani F., He Q., Goverde R.M.P., Liu X. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey // Transportation Research Part C. – 2018. – Vol. 90. – P. 226–246.
6. Fayzibaev S., Muxammedova Z., Raxmiddinov I. Optimization models of repair periods of electrical equipment of self-propelled rolling stock, according to its technical condition // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 458. – 01015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801015>
7. Rakhmiddinov I., Fayzibaev S., Kasimov O., Kosimov K., Panchenko V. Improving the structural reliability of self-propelled railcar frames through modernization techniques // AIP Conference Proceedings. – 2026. – Vol. 3447. – 060011. <https://doi.org/10.1063/12.0044293>
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
9. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785–794.
10. Breiman L. Random forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45. – P. 5–32.