



ELEKTROVOZ ELEKTR YURITMA SXEMALARINI VA ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH YO'LLARI TAHLILI

Murodov X.Sh. ¹[0000-0002-0517-8153], *Sayfiyev Sh.O'.* ²[0009-0000-3185-3899]

¹*Navoiy davlat konchilik va texnologiyalari universiteti, "Elektr energetikasi" kafedrası katta o'qituvchisi, texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD.)*

²*Navoiy davlat konchilik va texnologiyalari universiteti, "Elektr energetikasi" kafedrası assistenti*

Annotatsiya. Ushbu maqolada zamonaviy elektrovozlarining elektr yuritma tizimlari, ularning kuch sxemalari va energiya samaradorligiga ta'sir etuvchi omillar tahlil qilingan. An'anaviy reostatli sxemalardan boshlab, hozirgi kunda qo'llanilayotgan tiristorli, tranzistorli va inverterli boshqaruv tizimlari texnik va iqtisodiy jihatdan solishtiriladi. Maqolada elektrovoz elektr yuritma tizimining takomillashtirilgan sxemasi ishlab chiqilib, u orqali energiya samaradorligini oshirishning ilmiy asoslari keltirilgan. Kengaytirilgan impulsli modulyatsiya asosidagi inverter boshqaruv yordamida kuchlanish va tok qiymatlari aniq rostlanadi. Ushbu yondashuv energiya sarfini kamaytiradi, momentning silliq o'zgarishini ta'minlaydi hamda tormozlanish jarayonida rekuperatsiyani amalga oshiradi. Zamonaviy elektrovozlarda energiya samaradorligini oshirish uchun avtomatik boshqaruv algoritmlari ishlab chiqilgan bo'lib, ular real vaqt rejimida moment, tok va tezlikni optimallashtiradi. Sun'iy intellekt texnologiyalarini qo'llash orqali energiya samaradorligini oshirish masalalari tahlil qilindi. Sun'iy intellekt asosidagi monitoring tizimi real vaqt rejimida dvigatel parametrlaridan tok, kuchlanish, moment, haroratni tahlil qiladi, raqamli boshqaruv algoritmlari esa optimal energiya sarfini ta'minlaydi.

Kalit so'zlar: elektrovoz, elektr yuritma, kuch sxemasi, inverter, tiristor, energiya samaradorligi, rekuperatsiya, boshqaruv tizimi. Suniy intellekt, raqamli boshqaruv, elektrovoz, sensor, real vaqt monitoring, PWM, moment, tok, kuchlanish, harorat, asinxron motor, PID boshqaruv.

Аннотация. В данной статье проанализированы современные системы электрического привода электровозов, их силовые схемы и факторы, влияющие на энергоэффективность. Рассмотрены и сравнены с технической и экономической точек зрения традиционные реостатные схемы, а также современные тиристорные, транзисторные и инверторные системы управления. Разработана усовершенствованная схема системы электрического привода электровоза, позволяющая повысить энергоэффективность на научной основе. На основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) осуществляется точное регулирование значений напряжения и тока. Такой подход снижает энергопотребление, обеспечивает плавное изменение момента и реализует рекуперацию энергии в процессе торможения. Для повышения энергоэффективности в современных электровозах разработаны автоматические алгоритмы управления, которые в режиме реального времени оптимизируют параметры момента, тока и скорости. Рассмотрено применение технологий искусственного интеллекта для дальнейшего повышения энергоэффективности. Система мониторинга на основе искусственного интеллекта анализирует в реальном времени параметры двигателя ток, напряжение, момент и температуру, а цифровые алгоритмы управления обеспечивают оптимальное энергопотребление.

Ключевые слова: электровоз, электрический привод, силовая схема, инвертор, тиристор, энергоэффективность, рекуперация, система управления, искусственный интеллект, цифровое управление, электровоз, датчик, мониторинг в реальном времени, PWM, момент, ток, напряжение, температура, асинхронный двигатель, PID-управление.

Annotation. This article analyzes modern electric drive systems of locomotives, their power circuits, and factors affecting energy efficiency. The study compares traditional rheostatic control schemes with contemporary thyristor-based, transistor-based, and inverter-based control systems from both technical and economic perspectives. An improved electric drive circuit for locomotives has been developed, providing a scientific foundation for increasing energy efficiency. Using Pulse Width Modulation (KIM)-based inverter control, voltage and current values can be precisely regulated. This approach reduces energy consumption, ensures smooth torque variation, and enables energy recuperation during braking. To enhance energy efficiency, modern locomotives employ automatic control algorithms that optimize torque, current, and speed parameters in real time. The application of artificial intelligence technologies for improving energy efficiency is



also discussed. The AI-based monitoring system analyzes motor parameters such as current, voltage, torque, and temperature in real time, while digital control algorithms ensure optimal energy consumption.

Keywords: electric locomotive, electric drive, power circuit, inverter, thyristor, energy efficiency, regeneration, control system, artificial intelligence, digital control, sensor, real-time monitoring, PWM, torque, current, voltage, temperature, asynchronous motor, PID control.

Kirish

Elektrovozlarining energiya samaradorligi temir yo'l transportining umumiy iqtisodiy ko'rsatkichlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Elektr yuritma tizimlari — elektrovozning "yuragi" hisoblanadi [1,2]. Shu sababli, ularning kuch sxemalarini takomillashtirish orqali energiya yo'qotishlarini kamaytirish dolzarb masalalardan biridir. So'nggi yillarda elektrovozlar uchun energiya tejamkor boshqaruv tizimlari ishlab chiqish global transport energetikasida muhim yo'nalishga aylandi. Zamonaviy boshqaruv tizimlari elektr energiyasining isrofini kamaytirish, harakat jarayonini silliq boshqarish va tormoz energiyasidan qayta foydalanishni ta'minlashga qaratilgan. KIM usuli zamonaviy elektr yuritmalarda kuchlanish va tokni nozik boshqarish imkonini beradi. Elektrovoz elektr yuritmalarida KIM asosidagi inverterlar energiya oqimini uzluksiz rostdab, mexanik jarayonlarni silliq amalga oshiradi. Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekt tizimlarining transport energetikasiga joriy etilishi elektrovozlarning boshqaruv sifatini sezilarli darajada yaxshiladi. va sun'iy intellekt yordamida har bir yuritma tugunining ish holati onlayn kuzatilib, energiya tejamkor rejimlarda ishlash imkoniyati yaratiladi. Raqamli boshqaruv tizimi esa yuklama o'zgarishlariga moslashib, moment va tezlikni optimal tarzda boshqaradi [3-5]. Shu sababli, bu tizimlar yuqori samaradorlik, past tebranish va minimal issiqlik yo'qotish bilan ajralib turadi. Elektrovozlarda dastlab reostatli boshqaruv tizimlari qo'llanilgan bo'lib, ular yuqori quvvat yo'qotishlari bilan ajralib turgan. Keyinchalik tiristorli va tranzistorli sxemalar ishlab chiqildi, bu esa elektr energiyasini bosqichma-bosqich rostdash imkonini berdi. So'nggi yillarda esa inverterli boshqaruv tizimlari keng qo'llanilmoqda. Ushbu tizimlarda yarim o'tkazgich elementlar yordamida chastota va kuchlanish o'zgaruvchan boshqariladi, bu esa mexanik quvvat chiqishini optimallashtiradi. Bundan tashqari KIM boshqaruv tizimi mavjud va u KIM – bu elektr signalining impuls kengligini o'zgartirish orqali kuchlanish yoki tokni nazorat qilish usuli. Qurilmaga uzatilayotgan signal chastotasi bir xil, lekin impulsning davomiyligi o'zgaradi. Bu orqali chiqishdagi o'rtacha kuchlanish boshqariladi [6-9]

$$U_{o'rt} = U_{maks} * \frac{t_{on}}{T} \quad [V]$$

bu yerda: U_{maks} – maksimal kuchlanish, t_{on} – impuls yoqilgan vaqt, T – umumiy vaqt (ya'ni $T = t_{on} + t_{off}$ [s] PWM boshqaruv tizimi quyidagi asosiy qismlardan tashkil topgan:

- chastota o'zgartirgich (inverter) – IGBT tranzistorlar yordamida o'zgaruvchan kuchlanish hosil qiladi.
- PWM generator – tashqi signal asosida impulslar ketma-ketligini hosil qiladi.
- Boshqaruv moduli – raqamli mikrokontroller asosida ishlaydi va real vaqt rejimida tok va kuchlanishni kuzatadi.

Energiya tejamkorlikni oshirish uchun elektrovozlarda PID va adaptiv boshqaruv algoritmlari keng qo'llanadi.

PID boshqaruv tizimi (Proportsional-integral-deferensial rostlagich). PID — bu avtomatik nazorat tizimi bo'lib, chiqish qiymatini (masalan, dvigatel tezligi) kerakli qiymat bilan solishtiradi va xatolikni kamaytirish uchun uchta komponent asosida boshqaruv signalini hosil qiladi [10]

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

bu yerda: $e(t)$ — xatolik (setpoint – actual value), K_p — proporsional koeffitsient (tez javob), K_i — integral koeffitsient (barqarorlikni oshiradi), K_d - differensial koeffitsient (tebranishni kamaytiradi).



Algoritm moment va tezlik orasidagi bog'lanishni muvozanatlash orqali energiya sarfini minimallashtiradi.

Shuningdek, sun'iy intellekt asosidagi adaptiv boshqaruv tizimlari real vaqt rejimida yuklama o'zgarishlariga moslashadi. Tizimda barcha jarayonlar real vaqt rejimida qayta ishlanadi. Ma'lumotlar statistik tahlil asosida samaradorlik baholanadi.

1-jadval.

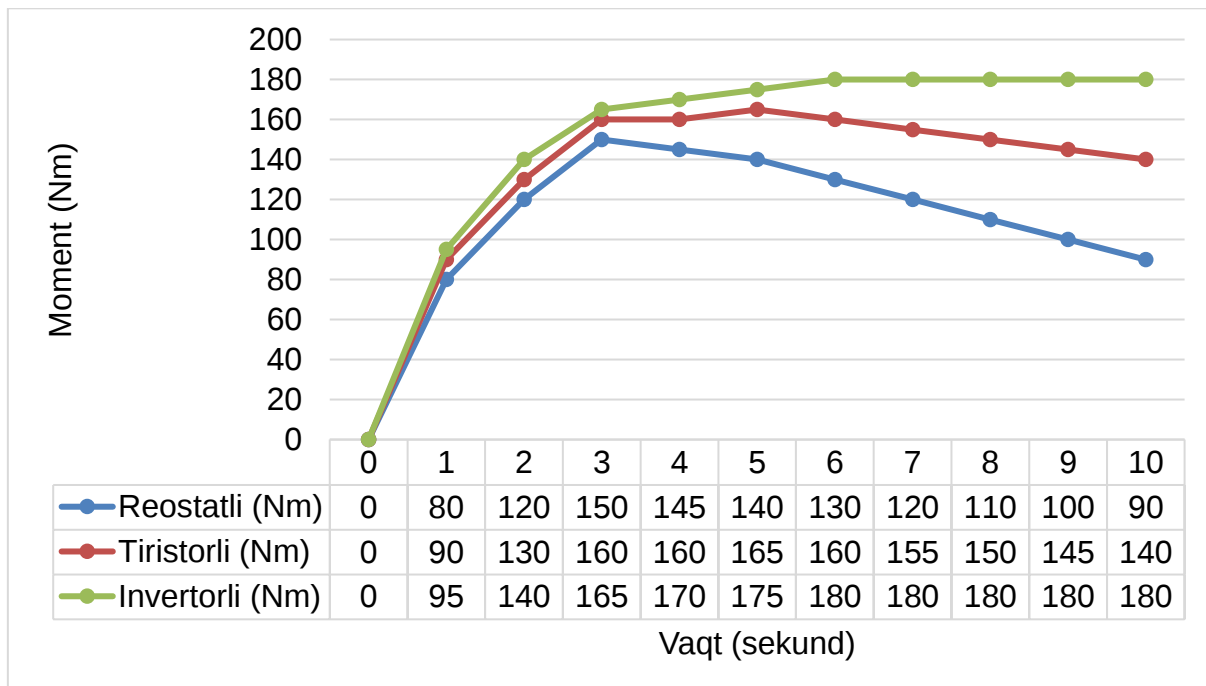
Tizim turi bo'yicha energiya samaradorligi jihatidan taqqoslash

Tizim turi	Samaradorlik (%)	Energiya yo'qotish darajasi	Afzalliklar	Kamchiliklar
Reostatli	75–80	Juda yuqori (issiqlik yo'qotishlari)	Oddiy tuzilma	Past energiya tejamkorlik
Tiristorli	85–88	O'rtacha	Bosqichli boshqaruv	Murakkab sovitish
Invertorli	92–96	Past	Rekuperativ tormozlash, barqaror moment	Yuqori narx, elektronika murakkabligi

Rekuperatsiya tizimi tormozlash vaqtida elektr motor generator rejimida ishlaydi. Ushbu holatda hosil bo'lgan elektr energiyasi tarmoqqa qaytariladi yoki yordamchi tizimlar uchun ishlatiladi. Rekuperatsiya samaradorligi quyidagi ifoda bilan baholanadi [11]

$$\eta_{rek} = \frac{E_{qayt}}{E_{tormoz}} * 100\%$$

Hozirda eng ko'pi bilan to'liq tormoz energiyasining 20–25% qismi qayta ishlatilgan. Bu esa umumiy energiya sarfini 6–9% gacha kamaytirgan. Hozirgi kunda quyidagi elektrovozlarda o'rnatilgan zamonaviy boshqaruv orqali quyidagilarga erishildi.



1-rasm. Elektrovoz elektr yuritmasining sxemalarini solishtirish grafigi: X o'qi – vaqt (s), Y o'qi – moment (Nm).

Grafikdan ko'rinadiki, invertorli tizimda moment tebranishi minimal, shuning uchun mexanik energiya yo'qotishlar kamroq bo'ladi [12].

**Energetik solishtirma tahlil**

Ko'rsatkich	An'anaviy tizim	Tejamkor boshqaruv tizimi	Farq (%)
Energiyani qayta ishlatish	0%	24%	+24
O'rtacha tok sarfi	100%	89%	-11
Tormoz samaradorligi	75%	88%	+13
Samaradorlik	91%	97%	+6

Siemens Vectron elektrovozi IGBT asosidagi inverter tizimi bilan jihozlangan, energiya tejash 15–20% gacha. Alstom Prima II raqamli boshqaruv moduli yordamida moment va tokni real vaqt rejimida optimallashtiradi. CRRC HXD1D (Xitoy) – rekuperativ tormozlash orqali tormoz energiyasining 30% gacha. O'zbekistonda ishlatilayotgan ayrim eski tipdagi 2ES5K elektrovozlarida hali ham tiristorli boshqaruv tizimlari mavjud. Simulyatsiya tahlillari shuni ko'rsatadiki, inverter asosidagi variantlarga o'tish elektr energiya sarfini 8–12% kamaytiradi. Bu esa yiliga minglab kilovatt-soat tejash imkonini beradi.

Xulosa

Xulosa qilib biz tahlil natijalaridan energiya tejamkor boshqaruv tizimlari orqali elektrovozlarning samaradorligini oshirish eng optimal usul ekanligini aniqladik. Bu tizim orqali biz rekuperativ tormozlash jarayonidan foydalana olamiz bu esa energiya oqimini qayta ishlatish imkonini beradi. Yuqoridagi tahlil natijalariga ko'ra elektrovozlarning energiya samaradorligini oshirish uchun inverterli boshqaruv tizimlariga bosqichma-bosqich o'tish eng maqsadga muvofiq yechimdir. Shu bilan birga, xorijiy davlatlarda ishlab chiqariladigan inverter bloklarini mahalliyashtirish iqtisodiy samaradorlikni yanada oshiradi. KIM asosidagi ishlovchi inverter sxemasi elektrovoz elektr yuritmasining samaradorligini oshirishda eng yaxshi usullardan biri hisoblanadi. Raqamli boshqaruv va sun'iy intellekt texnologiyalarini elektrovoz elektr yuritmalariga joriy etish natijasida energiya samaradorligi, xavfsizlik va texnik xizmat ko'rsatish sifatida sezilarli o'sish kuzatiladi. Sun'iy intellektni qo'llash uzluksiz monitoring va raqamli algoritmlar asosida adaptiv boshqaruv imkonini beradi va bu orqali ortiqcha energiya isrofini oldini olamiz va asinxron dvigatelnining qizishlari va mexanik zo'riqishlarini oldini olamiz va bu o'z navbatida dvigatelni uzoq muddat ishlashini ta'minlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yhati:

- [1]. Iyer N. P. R. Inverters and AC Drives: Control, Modeling, and Simulation Using Simulink. – Springer Nature, 2024. – 256 p.
- [2]. Patil M., Rodey P. Control Systems for Power Electronics: A Practical Guide. – Springer International Publishing, 2015. – 312 p.
- [3]. Mayergoyz I.D., Tyagi S. Pulse Width Modulation in Power Electronics. – World Scientific Publishing, 2021. – 198 p.
- [4]. Kim S.-H. Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors. – Elsevier Science, 2017. – 416 p.
- [5]. Chen W., Li Q., Dai Ch. New Energy Locomotive: Technology and Application. – Springer, 2025. – 354 p.
- [6]. Su S., Tian Zh., Goverde R.M.P. Energy-Efficient Train Operation: A System Approach for Railway Networks. – Springer, 2023. – 285 p.



- [7]. Bolvashenkov I., Herzog H.-G. Fault-Tolerant Traction Electric Drives: Reliability, Topologies and Components Design. – SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, 2019. – 120 p.
- [8]. Agarwal A.K. et al. Locomotives and Railroad Transportation: Technology, Challenges and Prospects. – Springer, 2020. – 447 p.
- [9]. Nayeemuddin M., Bramhananda R.T., Vijaya K.M. Continuous, Discontinuous & Level-Shifted PWM Algorithms for IM Drive. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 164 p.
- [10]. Rashid M.H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. – Pearson Education, 4th Edition, 2014. – 960 p.
- [11]. https://www.ordemdosengenheiros.pt/fotos/editor2/2023/230420_prt_mododetransporteferrovioario.pdf
- [12]. <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock-components/traction-converters.html>