ISSN:3030-332X
*Impact factor: 9,493*
International journal of scientific researchers

# ZAMONAVIY TORTUV ELEKTR YURITMALARIDA BOSHQARUV TIZIMLARINING RIVOJLANISH TENDENSIYALARI VA INTELLEKTUAL ALGORITMLARGA O‘TISH ZARURATI

**Xudoyberganov Sardorbek Baxodirovich**
Toshkent davlat transport universiteti, PhD, dotsent
**Kamoliddinov Suyundik Kamoliddin o‘g’li**
Toshkent davlat transport universiteti, magistratura talabasi
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.20111769

**Annotatsiya:** Ushbu maqolada tortuv elektr yuritmalarining evolyutsion rivojlanish bosqichlari tahlil qilingan. Tadqiqotda an’anaviy boshqaruv tizimlarining (PID, Vektor boshqaruv, DTC) energiya samaradorligi va dinamik barqarorlik nuqtayi nazaridan kamchiliklari ko‘rib chiqilib, sun’iy intellekt (AI) texnologiyalariga o‘tish zarurati asoslab berilgan. Shuningdek, maqolada temir yo‘l transporti, elektrobus va metro tizimlarida intellektual boshqaruvni qo‘llash bo‘yicha jahon tajribasi batafsil yoritilgan.

**Kalit so’zlar:** Zamonaviy tortuv elektr yuritmalari, an’anaviy boshqaruv tizimi, intellektual boshqaruv, vektor boshqaruv, sun’iy intellekt (AI).

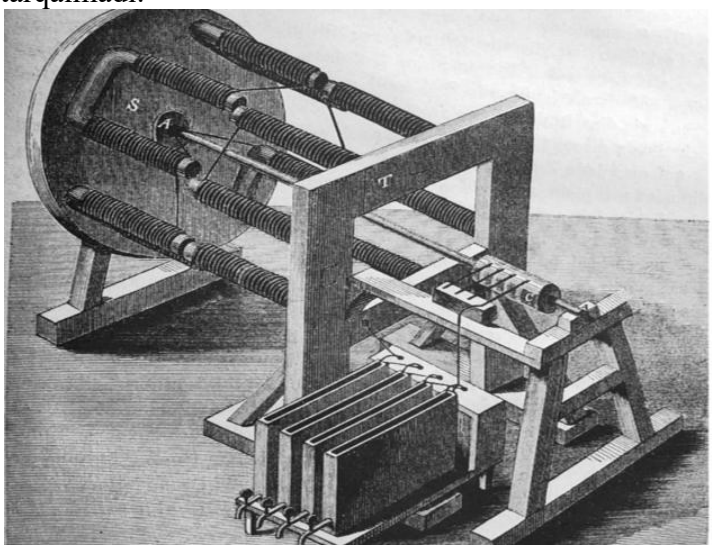
**Abstract:** This article analyzes the evolutionary development stages of traction electric drives. The study examines the disadvantages of traditional control systems (PID, Vector Control, DTC) in terms of energy efficiency and dynamic stability, and justifies the need to transition to artificial intelligence (AI) technologies. The article also provides a detailed overview of global experience in applying intelligent control in railway transport, electric bus, and metro systems.

**Keywords:** Modern traction electric drives, traditional control system, intelligent control, vector control, artificial intelligence (AI).

Zamonaviy dunyoda urbanizatsiya jarayonining jadallashishi va ekologik muammolarning ortishi transport tizimini tubdan isloh qilishni taqozo etmoqda. Xususan, temir yo‘l transporti, metro va elektrobuslar kabi tortuv elektr yuritmalari (TEY) samaradorligini oshirish global miqyosdagi ustuvor vazifalardan biridir. Elektr transport vositalarining energiya iste’moli va harakat xavfsizligi bevosita ulardagi boshqaruv tizimlarining mukammalligiga bog‘liq. Uzoq yillar davomida tortuv elektr yuritmalarda an’anaviy boshqaruv usullari, jumladan, PID-regulyatorlar, Vektor boshqaruv va To‘g‘ridan-to‘g‘ri momentni boshqarish (DTC) tizimlari keng qo‘llanilib kelindi. Biroq, ushbu klassik usullar ob’ekt parametrlarining o‘zgaruvchanligi, chiziqli bo‘lmagan xarakteristikalar va tashqi muhitning noaniq ta’sirlari sharoitida yuqori dinamik aniqlikni va maksimal energiya samaradorligini har doim ham ta’minlay olmaydi. Bu esa tizimda energiya isrofi ortishiga va barqarorlikning pasayishiga olib keladi. Mazkur maqolaning maqsadi tortuv elektr yuritmalari boshqaruv tizimlarining rivojlanish bosqichlarini tahlil qilish hamda an’anaviy tizimlardagi cheklovlarni bartaraf etishda sun’iy intellekt (AI) va intellektual algoritmlarning (neyron tarmoqlar, noaniq mantiq) afzalliklarini asoslab berishdan iborat. Shuningdek, xalqaro tajriba asosida temir yo‘l va shahar jamoat transportida intellektual boshqaruvni qo‘llashning iqtisodiy va texnik samaradorligi ko‘rib chiqiladi.

Elektr yuritma zamonaviy sanoat, transport va energetika tizimlarining eng muhim texnik asoslaridan biri bo‘lib, u elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantirish orqali turli mashina va mexanizmlarning harakatini ta’minlaydi. Elektr yuritmalarning rivojlanish tarixi elektromagnetizm haqidagi ilmiy kashfiyotlardan boshlanib, bugungi kunda sun’iy intellekt va raqamli boshqaruv tizimlari bilan uyg‘unlashgan murakkab intellektual tizimlargacha yetib kelgan. Elektr yuritmaning evolyutsiyasi insoniyatning texnik tafakkuri, sanoat ishlab chiqarishi va energetika tizimlarining bosqichma-bosqich rivojlanishi bilan chambarchas bog‘liqdir.

Elektr yuritmaning dastlabki shakllanishi XIX asr boshlarida elektromagnit hodisalarini o‘rganish bilan bog‘liq bo‘lib, 1824-yilda F. Arago tomonidan “aylanma magnitizm” hodisasi aniqlangan, bu hodisa keyinchalik elektr dvigatellar yaratish uchun nazariy asos bo‘lib xizmat qilgan. 1834-yilda rus olimi B.S. Yakobi tomonidan dunyoda birinchi amaliy elektr dvigatel yaratilgan bo‘lib, u aylanuvchi yakorga ega edi va elektromagnitlarning o‘zaro tortishish hamda itarilish kuchlari asosida ishlardi. 1838-yilda ushbu dvigatel yordamida Sankt-Peterburgda Neva daryosida elektr kater harakatga keltirildi va bu tarixda elektr energiyasidan transport vositasida foydalanishning birinchi amaliy tajribasi sifatida qayd etildi, biroq o‘sha davrda galvanik batareyalarning quvvati yetarli bo‘lmagani sababli bu texnologiya keng tarqalmadi.



1-rasm. B.S. Yakobi tomonidan ishlab chiqilgan elektr yuritma

XIX asrning ikkinchi yarmida elektr yuritmaning rivojlanishi sanoat generatorlarining yaratilishi bilan tezlashdi, 1870-yilda Z. Gramm tomonidan sanoat miqyosida ishlatiladigan generator ishlab chiqilishi elektr energiyasini barqaror ishlab chiqarish imkonini berdi, shu bilan birga A. Pachinotti tomonidan halqali yakorli elektr dvigatel yaratilishi elektr mashinalar samaradorligini oshirdi. Shu davrda elektr yuritmalar matbaa, to‘quv sanoati va metallga ishlov berish kabi sohalarda qo‘llanila boshladi. 1879-yilda V. Siemens tomonidan Berlin ko‘rgazmasida birinchi elektr temir yo‘li yaratilishi, 1880-yilda F.A. Pirotskiy tomonidan Sankt-Peterburgda birinchi elektr tramvay ishga tushirilishi elektr tortish tizimlarining paydo bo‘lishiga olib keldi, keyinchalik AQShda T. Edison tomonidan temir yo‘l uchastkasida elektr tortish tizimi sinovdan o‘tkazildi va 1895-yilda Baltimor–Ogayo liniyasida dunyodagi birinchi elektr temir yo‘l ishga tushirildi.

Elektr yuritma rivojlanishining navbatdagi muhim bosqichi o‘zgaruvchan tok va asinxron dvigatellar bilan bog‘liq bo‘lib, 1888-yilda N. Tesla va G. Ferraris aylanuvchi magnit maydon asosida ishlaydigan asinxron dvigatelni yaratdilar, keyinchalik M.O. Dolivo-Dobrovolskiy uch fazali asinxron dvigatelni ishlab chiqib, qisqa tutashgan rotorli “sichqon qafasi” konstruktsiyasini joriy etdi va “yulduz-uchburchak” ulanish tizimini taklif qildi, bu kashfiyot elektr yuritmaning sanoatda keng qo‘llanishiga asos bo‘ldi. 1891-yilda Frankfurt ko‘rgazmasida uzoq masofaga elektr energiyasi uzatilib, sanoat yuritmalarida foydalanish muvaffaqiyatli namoyish etildi va shu bilan elektr energiyasi asosiy sanoat energiya manbaiga aylandi.

XX asr boshlarida ishlab chiqarishda guruhli elektr yuritmalar keng qo‘llanilgan bo‘lib, bitta dvigatel bir nechta mexanizmni harakatga keltirgan, biroq bu tizimlar energiya yo‘qotishlari, murakkab mexanik uzatmalar va past moslashuvchanlik bilan tavsiflangan, shuning uchun asta-sekin individual elektr yuritmalarga o‘tish jarayoni boshlandi va har bir mexanizm uchun alohida elektr dvigatel qo‘llanilishi ishlab chiqarish samaradorligini oshirib, texnologik jarayonlarni ancha moslashuvchan qildi, dastlab bu jarayon iqtisodiy jihatdan qimmat bo‘lsa-da, vaqt o‘tishi bilan individual yuritmalar to‘liq ustunlikka ega bo‘ldi.

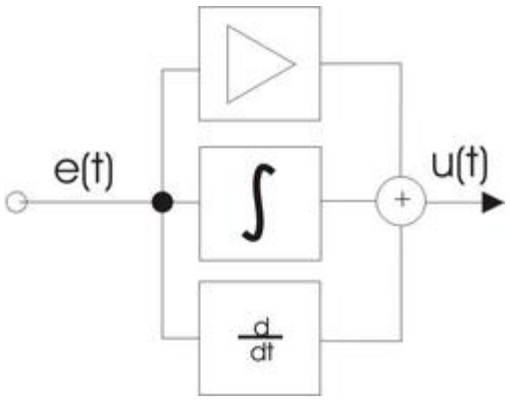
1930-yillardan boshlab elektr yuritmalarda avtomatlashtirish jarayoni rivojlana boshladi, yopiq boshqaruv tizimlari, kuchaytirgichlar va kuzatuvchi tizimlar ishlab chiqildi, generator–dvigatel tizimi keng qo‘llanildi, bu tizim tezlikni keng diapazonda boshqarish imkonini berdi va metallurgiya hamda og‘ir sanoatda keng ishlatildi, 1940-yillarga kelib statik o‘zgartirgichlar paydo bo‘lib, simobli to‘g‘rilagichlar asosida doimiy tok dvigatellari boshqarila boshlandi va bu elektr yuritmaning yangi bosqichini boshlab berdi.

1950-yillardan boshlab yarimo‘tkazgich texnologiyalarining rivojlanishi elektr yuritma tarixida inqilobiy burilish yasadi, 1948-yilda tranzistorlarning, 1955-yilda esa tiristorlarning yaratilishi natijasida kuch elektronika tez rivojlandi va simobli qurilmalar asta-sekin almashtirildi, natijada tiristorli o‘zgartirgich–dvigatel tizimi paydo bo‘ldi, bu tizim yuqori samaradorlik, ixchamlik, tezkor boshqaruv va ishonchlilik bilan ajralib turdi, shu davrdan boshlab chastota o‘zgartirgichlar asosida asinxron dvigatellarni boshqarish keng tarqaldi va elektr yuritmalar yanada mukammallashdi.

1960–1970-yillarda elektr yuritmalar nazariyasi va amaliyoti jadal rivojlanib, vektor boshqaruv tizimlari, diskret va qadamli dvigatellar, ventilli dvigatellar hamda chastota-tok boshqaruv tizimlari ishlab chiqildi, shu bilan birga mikroprotsessorlar va dasturlashtiriladigan mantiqiy kontrollerlar paydo bo‘lib, releli boshqaruv tizimlarini asta-sekin siqib chiqardi va elektr yuritmalarni boshqarish raqamli asosga o‘tdi, bu esa murakkab boshqaruv algoritmlarini amalga oshirish, diagnostika qilish va avtomatik sozlash imkonini berdi.

XXI asrga kelib elektr yuritmalar to‘liq raqamli va intellektual tizimlarga aylangan bo‘lib, hozirgi kunda adaptiv boshqaruv, fuzzy mantiq, neyron tarmoqlar va bashoratli boshqaruv algoritmlari keng qo‘llanilmoqda, mikrokontrollerlar va kuchli mikroprotsessorlar asosida elektr yuritmalar real vaqt rejimida boshqarilmoqda, bu esa ularning aniqligi, ishonchliligi va energiya samaradorligini sezilarli darajada oshirmoqda, zamonaviy elektr yuritmalarda IGBT, MOSFET, GTO kabi kuch yarimo‘tkazgich qurilmalari asosida ishlovchi chastota o‘zgartirgichlar qo‘llanilib, asinxron dvigatellarning tezligi va momenti yuqori aniqlikda boshqarilmoqda. Bugungi kunda elektr yuritmalar sanoat, transport, energetika, robototexnika, metro va temir yo‘l tizimlarida keng qo‘llanilib, ayniqsa elektr tortish tizimlarida katta ahamiyatga ega bo‘lib, ular yuqori quvvat, ishonchlilik va energiya tejamkorlikni ta’minlamoqda, shu bilan birga mexatron tizimlar, motor-g‘ildirak konstruktsiyalari, elektroshpindellar va integratsiyalashgan yuritmalar sanoatning yangi bosqichini tashkil etmoqda, kelajakda esa elektr yuritmalar sun’iy intellekt, aqlli tarmoqlar va yangi materiallar asosida yanada rivojlanib, to‘liq avtomatlashtirilgan va o‘zini o‘zi boshqaradigan tizimlarga aylanishi kutilmoqda, bu esa sanoat va transport tizimlarining samaradorligini yanada oshiradi va elektr yuritmalar evolyutsiyasini yangi bosqichga olib chiqadi.

**PID boshqaruv** bu proporsional integral differensial (Proportional-integral-derivative) so‘zlaridan olingan bo‘lib tizimlarda elektr yuritmalarning tezligini va robotlarning qo‘llarining harakatini boshqarishda ishlatiladigan boshqaruv qurilmasi hisoblanadi. Bu boshqaruv qurilmasi XX-asrda ishga tushirilgan bo‘lib 1940-yillardan boshlab elektr sanoatida elektr yuritmalarni boshqarishda ishlatila boshlagan. PID orqali boshqarish tizimda ishonchlilikni oshirish xatolar darajasini minimalga yaqinlashtirish qobiliyati bilan farqlanadi bu tizim o‘tmishdagi xatolarga tayangan holda kelajakni bashorat qilish qobiliyatiga ega. Hozirgi kunda PID boshqaruvini (su’niy neyron tarmoqlari, vektor boshqaruv) usullari orqali mukammalshtirilib borilmoqda va sanoatning 90 foizidan ortig’i PID boshqaruv bilan amalga oshiriladi. PID boshqaruv tizimi juda ommabop bo‘lsa-da, u ideal emas. Uning asosiy kamchiliklari asosan tizimning "qotib qolgan" matematikaga asoslangani va o‘zgaruvchan sharoitlarga moslasha olmasligi bilan bog‘liq. U o‘z xatolaridan xulosa chiqarmaydi. Agar dvigatel eskirib, qismlari yedirilsa, PID buni tushunmaydi va eski sozlamalar bilan ishlashda davom etaveradi. Vaqt o‘tishi bilan boshqaruv sifati pasayadi va muhandis uni yana qaytadan sozlashiga to‘g‘ri keladi.




2-rasm. PID boshqaruv blok-sxemasi

Ushbu rasmda PID boshqaruv blok-sxemasi tasvirlangan bo‘lib sxema chapdan o‘ngga qarab ishlaydi va quyidagi qismlardan iborat: Chap tomonda tizimning kirish xatolik signali bu signal kerakli qiymat va joriy qiymat o‘rtasidagi farqni bildiradi. Markazda signallar parallel ravishda uchta matematik operatsiyani bajaradigan bloklardan o‘tadi. P-qism Yuqorida Signal uchburchak kuchaytirgich orqali kuchaytiriladi (doimiy koeffitsiyentga ko‘paytiriladi). I-qism Markazda signal integrallovchi blok (integral belgisi) orqali vaqt bo‘yicha yig'iladi.D-qism pastda: Signal differensiallovchi blok orqali signalning o‘zgarish tezligi bo‘yicha hisoblanadi.O‘ng tomonda uchta parallel blokning chiqishlari yig'ish nuqtasida qo‘shish belgisi qo‘shiladi va yakuniy boshqarish signali sifatida chiqariladi.Bu sxema ko‘p sanoat va avtomatik boshqaruv tizimlarining poydevori hisoblanadi va uning maqsadi xatolik signalini tez va barqaror minimallashtirishdir.

**Vektor boshqaruv** - bu oddiy boshqaruv va yuqori samaradorlikka erishish uchun uch fazali vosita boshqaruvini bir xil cho‘tkasi bo‘lgan shahar motoriga aylantirishi mumkin bo‘lgan vosita boshqaruv texnologiyasi. Vektor boshqaruv bu sanoat tizimidagi asinxron va sinxron motorlarni aniq boshqarsa bo‘ladigan tizim hisoblanib bu tizim oddiy boshqaruvga nisbatan ko‘p jihatdan ustun qaraladi. Vektor boshqaruvda tokni va momentni alohida alohida boshqarilib xuddiki elektr yuritmani o‘zgarmas tok kabi boshqarish mumkin bo‘ladi.Afzalliklari juda keng tezlikni silliq boshqarish mumkin samaradorlik yuqori bo‘ladi.

**DTC boshqaruv** ham tok va kuchlanish orqali boshqariladigan tizim hisoblanib asosiy ustunligi juda tez javob berish ya’ni dinamikasi kuchli. Tuzulish jihatdan juda sodda va matematik hisoblashda ustunlik qiladi. Og’ir sanoatda asosan DTC boshqaruvdan foydalaniladi.

1-jadval

| Tizim | Afzalliklari | Kamchiliklari |
|---|---|---|
| **PID** | Oddiy va tushunarli<br>Hisoblash oson<br>Ko‘p tizimlarda ishlaydi | Aniqlik yuqori emas<br>Murakkab tizimlarga mos emas<br>Moslash qiyin |
| **Vektor boshqaruv (FOC)** | Juda aniq moment boshqaruvi<br>Past tezlikda yaxshi ishlaydi<br>Silliq va barqaror<br>Energiya samarador | Hisoblash murakkab<br>Sensor va model talab qiladi<br>Dasturlash qiyin |
| **DTC** | Juda tez javob (dynamic response)<br>Tuzilishi oddiyroq<br>Sensor kam kerak<br>Kuchli moment hosil qiladi | Moment pulsatsiyasi bor<br>Shovqin ko‘proq<br>Past tezlikda aniqlik pastroq |




3-rasm. Vizual foiz diagramma

**Tortuv elektr yuritmalari boshqaruv tizimlarini kompleks baholash va integratsiyalashgan yondashuv.** Zamonaviy tortuv elektr yuritmalari murakkab va o‘zgaruvchan sharoitlarda ishlovchi ob’ektlar hisoblangani uchun ularni baholashda faqat bitta ko‘rsatkich (masalan, tezlik aniqligi) bilan cheklanib qolmasdan, tizimning energiya samaradorligi, dinamik barqarorligi va mexanik ishonchliligini o‘z ichiga olgan kompleks ko‘rsatkichlar tizimidan foydalanish zarur. An’anaviy boshqaruv tizimlarining cheklanganligi.Klassik boshqaruv usullari (PID, Vektor, DTC) "qattiq" matematik modellarga tayanadi. Kompleks baholash shuni ko‘rsatadiki, ushbu tizimlar quyidagi holatlarda samaradorligini yo‘qotadi:

- Ob’ekt parametrlarining drifti: Dvigatelning qizishi natijasida aktiv qarshilikning o‘zgarishi matematik modelning haqiqiy holatdan farq qilishiga va energiya isrofining ortishiga olib keladi.
- Chiziqli bo‘lmagan yuklamalar: Yo‘lovchilar oqimi hisobiga og‘irlikning keskin o‘zgarishi PID regulyatorlarining oskillatsiyasiga (tebranishiga) sabab bo‘ladi.
- Mexanik rezonans**:** DTC tizimlaridagi yuqori moment pulsatsiyasi reduktor va podshipniklarning 20-30% tezroq yeyilishiga olib keladi.

An’anaviy tizimlarni sun’iy intellekt (AI) bilan integratsiyalash orqali TEYning ishlash ko‘rsatkichlarini yangi bosqichga olib chiqish mumkin. Bu jarayon quyidagi mezonlar bo‘yicha baholanadi:A. Dinamik barqarorlik va "G‘ildirak-rels" ilashishi:An’anaviy tizimlar sirpanishni yetarlicha tez seza olmaydi. Intellektual boshqaruv (ilashish koeffitsiyenti va sirpanish tezligi) grafigidagi maksimal nuqtani real vaqtda aniqlaydi va ish nuqtasini shu zonada ushlab turadi. Bu nafaqat xavfsizlikni, balki tortish kuchining maksimal samaradorligini ta’minlaydi. B. Energiya samaradorligining miqdoriy bahosi:AI algoritmlari (Neyron tarmoqlar, MPC) qo‘llanilganda energiya isrofi an’anaviy tizimlarga nisbatan 5% dan 12% gacha kamayishi isbotlangan. Bu ko‘rsatkich, ayniqsa, tez-tez to‘xtab-qo‘zg‘aluvchi metro va elektrobus tizimlarida rekuperativ tormozlash samaradorligini oshirish hisobiga erishiladi va quyidagi jadvalda kompleks baholashning qiyosiy ko‘rsatkichlari ko‘rsatilgan.

2-jadval

| **Baholash mezoni** | **An’anaviy usullar** | **Intellektual-Integratsiyalashgan tizim** | **Iqtisodiy-texnik natija** |
|---|---|---|---|
| **Parametrik adaptivlik** | Past (modelga bog‘langan) | Yuqori (o‘zi o‘rganuvchi) | Uskuna muddatini 25% ga uzaytirish |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Moment pulsatsiyasi** | Yuqori (DTC da) | Minimal (Fuzzy Logic orqali) | Mexanik yeyilishning 20-30% kamayishi |
| **Energiya iste'moli** | Yuqori (o'tish jarayonlarida) | Optimallashgan | 5-12% gacha elektr energiyasi tejamkorligi |
| **Xavfsizlik (Sirpanish)** | Kechikish bilan javob beradi | Mikrosekundlarda bashorat qiladi | Avariya holatlarini 90% aniqlikda sezish |

**Energiya samaradorligining pasayishiga olib keluvchi omillar**

Tortuv transportida ya'ni temir yo'l metro tizimlarida energiya sarfi katta ko'rsatgichga to'g'ri keladi va quyidagi holatlarda bu ko'rsatgich yaqqol bilinishi mumkin.

- Poyezd joyidan qo'zg'alayotganda yoki to'xtayotganda tortuv dvigatelining toki va kuchlanishi keskin o'zgaradi. PID yoki an'anaviy skalyar boshqaruv bu vaqtda dvigatelga eng optimal tok miqdorini tezkorlik bilan yetkazib bera olmaydi. Natijada, dvigatelning mis (stator chulg'amlari) va po'lat (rotor) qismlarida issiqlik ko'rinishida katta energiya isrofi yuzaga keladi.
- Yuqori tezliklarda harakatlanganda dvigatel magnit oqimini pasaytirish rejimi talab etiladi. An'anaviy vektor boshqaruvda bu jarayon matematik modelga qat'iy bog'langan. Agar dvigatel qizisa, uning aktiv qarshiligi o'zgaradi va hisoblangan matematik model haqiqiy holatdan farq qila boshlaydi, bu esa energiya sarfining ortishiga olib keladi.
- Rekuperativ tormozlashning past samaradorligi: Tortuv tizimlarining eng katta yutug'i to'xtash vaqtida energiyani tarmoqqa qaytarishdir. Ammo, an'anaviy chiziqli regulyatorlar tormozlanish rejimiga o'tishdagi kechikishlar tufayli mexanik kinetik energiyani to'liq elektr energiyasiga aylantirib ulgurmaydi.

**Real ekspluatatsiya sharoitlarida AI algoritmlarining barqarorlik va energiya samaradorligiga ta'siri:**

Tortuv elektr yuritmalari (TEY) laboratoriya sharoitidan farqli o'laroq, tasodifiy o'zgaruvchi tashqi muhitda ishlaydi. An'anaviy boshqaruv tizimlari ushbu omillarni "shovqin" sifatida qabul qilsa, AI algoritmlari ularni tizim modelining bir qismi sifatida qayta ishlaydi.

1. O'zgaruvchan yuklama dinamikasiga moslashuvchanlik: Metro va shahar jamoat transportida vagon og'irligi yo'lovchilar oqimi hisobiga bir necha soniya ichida keskin o'zgarishi mumkin. An'anaviy tizimlar muammosi: PID-regulyatorlarining koeffitsiyentlari qat'iy belgilangan bo'lib, yuklama keskin ortganda poyezdning silkinib harakatlanishiga sabab bo'ladi. AI yechimi: Noaniq mantiq (Fuzzy Logic) algoritmlari vagon ichidagi yuklama o'zgarishini real vaqtda tahlil qilib, tezlanish grafigini silliqlashtiradi. Masalan, Dubay metrosida ushbu yondashuv poyezdning qo'zg'alish va to'xtashidagi noqulayliklarni deyarli yo'qotgan.

2. Rels holati va "G'ildirak-rels" ilashish barqarorligi ob-havo (yomg'ir, qor) va relslarning mexanik yeyilishi ilashish koeffitsiyentining keskin tushib ketishiga olib keladi. Dinamik beqarorlik: Sirpanish yuzaga kelganda, an'anaviy tizimlar uni mikrosekundlarda seza olmaydi, natijada g'ildirak va relsning jadal yeyilishi sodir bo'ladi. Intellektual barqarorlik: Neyron tarmoqlari g'ildirak sirpanishini oldindan bashorat qiladi va momentni optimal ilashish nuqtasida ushlab turadi. Natija: CRRC (Xitoy) tajribasida neyron tarmoqlar g'ildirak sirpanishini 98% aniqlikda bartaraf etishga imkon bergan.

3. Iqlimiy va termal omillarning energiya samaradorligiga ta'siri atrof-muhit harorati va ishchi rejimdagi qizish dvigatel parametrlarini o'zgartiradi. Energiya isrofi: Dvigatel qiziganda uning aktiv qarshiligi o'zgaradi. An'anaviy vektor boshqaruv ushbu o'zgarishni hisobga olmagani sababli, magnit oqimi va moment muvozanati buziladi, bu esa issiqlik ko'rinishidagi energiya isrofini oshiradi. Adaptiv boshqaruv: AI algoritmlari (Neyron tarmoqlar) dvigatel parametrlarini real vaqtda "kuzatish" orqali model xatoliklarini o'zi to'g'irlaydi. Bu energiya isrofini an'anaviy tizimlarga nisbatan 5% dan 12% gacha kamaytirish imkonini beradi. 4. Yo'l relyefi va intellektual energiya boshqaruviReal

ekspluatatsiyada yo‘l relyefi (tepalik va pastliklar) energiya sarfiga bevosita ta’sir qiladi. Range Optimization: Elektrobuslarda (masalan, BYD) qo‘llaniladigan AI tizimlari yo‘l relyefini hisobga olib, dvigatelning ishlash koeffitsiyentlarini dinamik o‘zgartiradi. Amaliy natija: Bunday intellektual energiya boshqaruv tizimlari (Smart EMS) bir marta quvvat bilan bosib o‘tiladigan masofani 10% ga oshirishga xizmat qiladi.

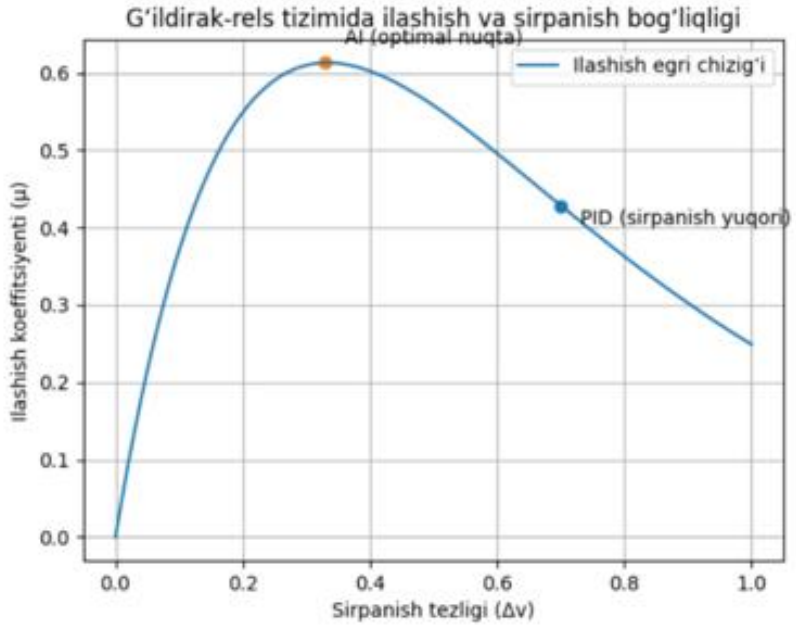
**Dinamik barqarorlik va xavfsizlik muammolari**

Dinamik barqarorlik bu transport vositasining har qanday tashqi ta'sirlarga qaramay, berilgan tezlik va yo‘nalishni silliq ushlab turish qobiliyatidir. An'anaviy usullar bu borada quyidagi jiddiy muammolarga duch keladi:

- G‘ildirak va rels o‘rtasidagi ilashish muammosi: Ob-havo sharoiti (yomg‘ir, qor) yoki relsning yeyilishi natijasida g‘ildirakning ilashish koeffitsiyenti keskin tushib ketadi. Poyezd tezlanish olganda g‘ildirak sirpana boshlaydi. An'anaviy PID tizimlari bu kutilmagan sirpanishni yetarlicha tez seza olmaydi, natijada rels va g‘ildirak tez ishdan chiqadi, poyezd esa o‘z muvozanatini yo‘qotadi.
- Yuklamaning chiziqsiz o‘zgarishlari: Metro va elektrobuslar to‘xtash bekatlarida yo‘lovchilarni olinishi hisobiga bir necha soniya ichida o‘nlab tonna og‘irlikka o‘zgarishi mumkin. Koeffitsiyentlari oldindan qat'iy belgilab qo‘yilgan PID regulyatorlari bunday "chiziqsiz" sakrashlarga moslasha olmaydi. Bu esa poyezdning silkinib harakatlanishiga (oskillatsiya) olib keladi.
- Mexanik rezonans va moment pulsatsiyasi: DTC (To‘g‘ridan-to‘g‘ri momentni boshqarish) tizimi garchi tezkor bo‘lsa-da, dvigatel valiga uzatiladigan momentda kuchli titrashlar hosil qiladi. Bu titrashlar vaqt o‘tishi bilan transportning reduktorlari, uzatmalari va podshipniklarida mexanik charchoqni keltirib chiqaradi va avariyalarga sabab bo‘ladi.

An’anaviy boshqaruv tizimdan su’niy intellekt (AI) tizimlariga o‘tish temir tizimi metrolar uchun zarur bo‘lgan jarayon hisoblanadi va bu jarayonni quyidagicha olib borish mumkin:

An’anaviy tizimlar "qattiq" algoritmlarga tayanadi. AI esa adaptiv (moslashuvchan). Noaniqlik bilan ishlash: AI dvigatelning qizishi, relslarning namligi yoki vagon ichidagi yo‘lovchilar sonining o‘zgarishi kabi noaniq faktorlarni hisobga oladi. Matematik modelga bog‘lanmaslik: Vektor boshqaruv ishlashi uchun dvigatelning har bir qarshiligini bilish kerak. AI esa tizimni "kuzatish" orqali o‘rganadi va model xatoliklarini o‘zi to‘g‘irlaydi.




4-rasm. G’ildirak-rels tizimida ilashish va sirpanish bog’liqligi

Ushbu grafik g‘ildirak va rels o‘rtasidagi ilashish koeffitsiyenti (μ) ning sirpanish tezligiga (Δv) bog‘liqligini ifodalaydi va transport tizimlarida dinamik barqarorlikni ta’minlash muammosini aniq ko‘rsatib beradi. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, sirpanish tezligi ortib borganda ilashish dastlab oshadi va

ma’lum bir optimal nuqtaga yetadi, undan keyin esa keskin kamayadi. Aynan shu maksimal nuqta tizim uchun eng samarali ish rejimi bo‘lib, unda g‘ildirak rels bilan maksimal darajada “ushlanadi” va tortish kuchi eng yuqori qiymatga ega bo‘ladi. An’anaviy PID boshqaruv tizimlari real vaqt rejimida ushbu optimal nuqtani aniqlash va ushlab turishda yetarlicha tez va moslashuvchan bo‘lmagani sababli, ularning ish nuqtasi ko‘pincha grafikning o‘ng tomoniga, ya’ni sirpanish ortib ketgan sohasiga siljiydi, bu esa ilashishning pasayishiga, g‘ildirakning sirpanishiga va natijada mexanik yeyilish hamda xavfsizlikning kamayishiga olib keladi. Sun’iy intellekt asosidagi boshqaruv tizimi esa aksincha, tizim parametrlarini doimiy kuzatib borib, ish nuqtasini maksimal ilashish zonasiga yaqin holatda ushlab turadi, bu orqali tortish kuchi optimal darajada saqlanadi, sirpanish minimal bo‘ladi va umumiy dinamik barqarorlik sezilarli darajada oshadi. Natijada, bunday yondashuv nafaqat energiya samaradorligini yaxshilaydi, balki transport vositasining xavfsiz va barqaror harakatlanishini ham ta’minlaydi.

1. Ilashish xarakteristikasining yuqori darajadagi noaniqligi. G‘ildirak va rels o‘rtasidagi ilashish jarayoni o‘ta murakkab fizik jarayon bo‘lib, u nafaqat mexanik kuchlarga, balki: Atrof-muhit holatiga namlik, muzlama, rels yuzasidagi moy qatlamlari yoki burglar poyezdning harakat tezligi, relsning geometrik notekisliklari va vagonlarning vertikal tebranishlariga bog‘liq.An’anaviy algoritmlar ko‘pincha ilashishning o‘rtacha qiymatiga asoslanadi, biroq real sharoitda ilashish egri chizig‘ining cho‘qqisi doimiy ravishda o‘zgarib turadi. Universal algoritm aynan mana shu "ko‘chib yuruvchi" cho‘qqini mikrosekundlar ichida aniqlashi lozim.

2. Mavjud tizimlarning kamchiliklari. Bugungi kunda keng qo‘llaniladigan sirpanishga qarshi tizimlar asosan ostonaviy usulda ishlaydi. Ya’ni, sirpanish ma’lum bir darajaga yetgandagina tizim tortish kuchini keskin kamaytiradi. Bu usul reaktiv xarakterga ega u muammoni bartaraf etadi, lekin tizimni optimal nuqtada ushlab turmaydi.Bizga reaktiv emas, balki bashorat qiluvchi universal algoritmlar zarur. Ular sirpanish boshlanishidan avval "g‘ildirak-rels" kontaktidagi elastik deformatsiyalarni tahlil qilib, momentni optimal darajada saqlashi kerak.

3. Universal adaptivlik muammosi. Hozirgi algoritmlarning aksariyati ma’lum bir turdagi lokomotiv yoki rels turiga moslab sozlanadi universal adaptiv algoritm esa: O‘z-o‘zini sozlash,har xil turdagi tortuv motorlari va turli iqlimiy hududlarda qo‘shimcha dasturlashsiz ishlay olishi g‘ildirakning yeyilishi natijasida diametrning o‘zgarishi kabi faktorlarni AI yordamida "o‘rganib" borishi kerak.

4. Intellektual algoritmlarning (AI) roli universal adaptiv yechim sifatida quyidagi intellektual yondashuvlarni maqolaga qo‘shimcha qilish mumkin: Ekstremum qidirish algoritmlari: Ilashish egri chizig‘ining modelini bilmagan holda, matematik usullar bilan uning cho‘qqisini real vaqtda "qidirib topish".Neyro-fuziy boshqaruv: Noaniq mantiq (Fuzzy Logic) yordamida rels holatini "nam", "juda silliq" yoki "quruq" deb tasniflash va neyron tarmoqlar orqali tortish momentini ushbu holatga moslash.

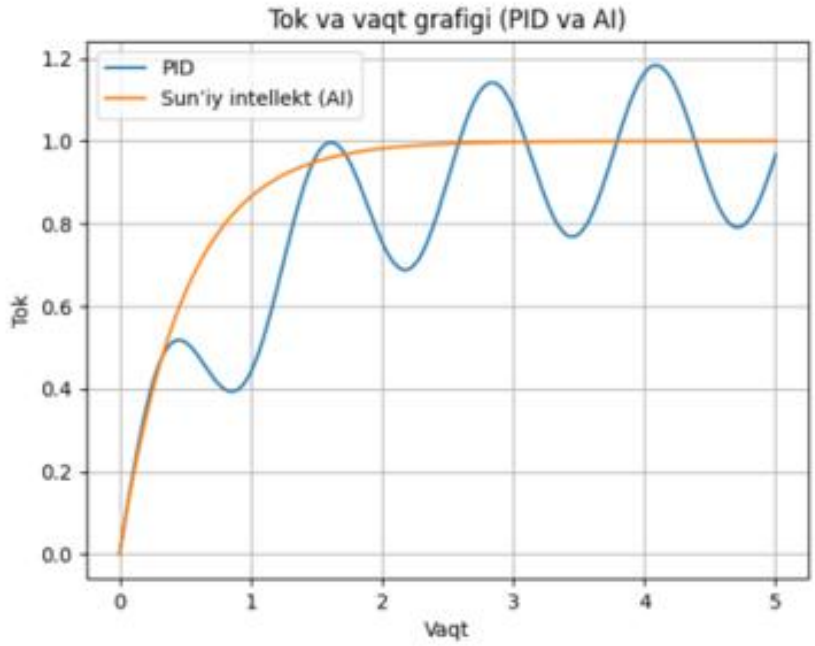
**AI tizimlarining asosiy turlari va ularning vazifasi**

Elektr yuritmalarda asosan quyidagi uchta AI yo‘nalishi qo‘llaniladi:

- Neyron tarmoqlar bu boshqaruv asosan adaptip boshqaruv sifatida qo‘llaniladi. Ular dvigatelning o‘zgaruvchan parametrlarini real vaqtda aniqlaydi va natijada PID koeffitsiyentlarini avtomatik tarzda o‘zgartirib, tizimni doimo optimal holatda ushlab turadi.
- Noaniq mantiq (Fuzzy Logic) Bu tizim "ha" yoki "yo‘q" (0 yoki 1) o‘rniga, insoniy tajribaga asoslangan ("biroz tezroq", "juda issiq") qarorlarni qabul qiladi va shu bilan birga murakkab va chiziqli bo‘lmagan jarayonlarni boshqaradi. Shunday qilib natija DTC boshqaruvidagi moment titrashlarini keskin kamaytiradi va poyezdning silliq harakatlanishini ta'minlaydi.

**AI tizimiga o‘tishning iqtisodiy va texnik samarasi**

AI algoritmlari energiya isrofini an'anaviy tizimlarga nisbatan 5% dan 12% gacha kamaytirishi isbotlangan va uskunalarning ishlash vaqtini uzaytiradi. Moment pulsatsiyasining kamayishi hisobiga reduktorlar va mexanik uzatmalarning yeyilishi 20-30% ga sekinlashadi.AI tizimlari avariya holatlarini (masalan, qisqa tutashuv boshlanishi yoki podshipnik nosozligi) an'anaviy datchiklardan ko‘ra tezroq aniqlaydi.




5-rasm. Elektr yuritmada tokning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi: PID va sun’iy intellekt asosidagi boshqaruv algoritmlarining taqqoslanishi.

**Temir yo‘l tizimlari jahon tajribasi**

Yuqori tezlikda harakatlanuvchi poyezdlarda (Shinkansen, TGV, ICE) asosiy e’tibor "Intellektual tortish texnologiyasiga qaratilgan.

• Xitoy (CRRC): Dunyodagi eng yirik poyezd ishlab chiqaruvchisi bo‘lgan CRRC hozirda poyezdlarida "Big Data + AI" tizimini qo‘llamoqda. Ular g‘ildirak sirpanishini oldindan bashorat qiluvchi neyron tarmoqlardan foydalanadi. Bu tizim rels holatini real vaqtda tahlil qilib, momentni mikrosekundlarda o‘zgartiradi.

• Germaniya (Siemens Mobility): Ularning Sibas PN tizimi intellektual nazorat yordamida poyezdning energiya sarfini 10-15% gacha tejashga muvaffaq bo‘lgan. Ular asosan "bashorat qiluvchi boshqaruv" (Model Predictive Control - MPC) algoritmlarini AI bilan birlashtirgan.

**Metro tizimlari (Metropoliten)**

Metro tizimlarida AI asosan haydovchisiz boshqaruv (GoA4) va silliq to‘xtash-qo‘zg‘alish uchun ishlatiladi.

• Singapur va Parij metrosi: Bu shaharlarda Alstom kompaniyasining Urbalis tizimi qo‘llaniladi. AI algoritmi stansiyalar orasidagi masofani, yo‘lovchilar oqimi tufayli ortgan vaznni va elektr tarmog‘idagi kuchlanishni hisobga olib, eng optimal tezlanish grafigini chizadi.

• Dubay metrosi: Bu yerda "Noaniq mantiq" (Fuzzy Logic) asosidagi regulyatorlar qo‘llaniladi. Bu yo‘lovchilar uchun poyezdning keskin to‘xtashi va yurishidagi noqulayliklarni (jerk) deyarli yo‘qotib, harakatlanish silliqligini maksimal darajaga chiqargan.

3. Elektrobuslar

Elektrobuslarda energiya manbai (akkumulyator) cheklangan bo‘lgani uchun, AI asosiy e’tiborni "Range Optimization" (masofani uzaytirish)ga qaratadi.

• BYD (Xitoy): O‘zbekistonda ham keng tarqalgan BYD elektrobuslari intellektual energiya boshqaruv tizimiga (Smart EMS) ega. AI tizimi yo‘l relyefini (tepalik yoki pastekislik) hisobga olib, dvigatelning vektor boshqaruv koeffitsiyentlarini o‘zgartiradi. Natijada akkumulyator quvvati ancha tejaladi.

• Tesla (Heavy Duty): Garchi ular yuk mashinalari (Semi) bilan mashhur bo‘lsa-da, ularning tortish algoritmlari neyron tarmoqlar yordamida har bir g‘ildirakdagi momentni alohida boshqaradi (Torque Vectoring). Bu hatto muzlagan yo‘llarda ham elektrobusning dinamik barqarorligini ta’minlaydi.

3-jadval

| Kompaniya / Tizim | Qo‘llanilgan AI usuli | Erishilgan natija |
|---|---|---|
| CRRC (Xitoy) | Neyron tarmoqlar (Deep Learning) | G‘ildirak sirpanishini 98% aniqlikda bartaraf etish |
| Alstom (Urbalis) | Fuzzy Logic + MPC | Energiya sarfini 15% gacha kamaytirish |
| BYD (Smart EMS) | Adaptiv intellektual algoritmlar | Bir marta quvvat bilan bosib o‘tiladigan masofani 10% ga oshirish |
| Siemens (Predictive) | Big Data Analytics | Uskunalarning ishdan chiqishini oldindan sezish (90% aniqlik) |

**Xulosa.** Ushbu tadqiqot tortuv elektr yuritmalari boshqaruv tizimlarida an’anaviy usullardan intellektual algoritmlarga o‘tish texnik va iqtisodiy zaruriyat ekanligini ko‘rsatdi. Olingan natijalar asosida quyidagi xulosalarga kelindi:Texnik cheklovlar: An’anaviy PID va vektor boshqaruv tizimlari dvigatel parametrlarining o‘zgarishi hamda g‘ildirak-rels ilashishining noaniqligi sharoitida yuqori aniqlikni ta’minlay olmaydi, bu esa tizimda energiya isrofi va dinamik barqarorlikning pasayishiga olib keladi.Energiya samaradorligi: Sun’iy intellekt (AI) algoritmlarini tatbiq etish energiya isrofini an’anaviy tizimlarga nisbatan 5% dan 12% gacha kamaytirish imkonini beradi.Mexanik ishonchlilik: Noaniq mantiq (Fuzzy Logic) va neyron tarmoqlaridan foydalanish moment pulsatsiyasini kamaytirib, mexanik uzatmalarning yeyilishini 20-30% ga sekinlashtiradi.Global tajriba: Siemens, Alstom va CRRC kabi jahon yetakchilari tajribasi intellektual boshqaruv (GoA4, MPC) haydovchisiz boshqaruvni xavfsiz amalga oshirish va poyezdlar harakati silliqligini oshirishning asosiy omili ekanligini isbotlamoqda.Umuman olganda, tortuv tizimlariga sun’iy intellekt elementlarini joriy etish transport vositalarining harakat xavfsizligini kafolatlash bilan birga, ularning foydalanish muddatini uzaytirish va energiya sarfini optimallashtirish imkonini beradi.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Siemens Mobility. Digital Rail Innovation Report 2025: Intelligent Traction Systems and Energy Efficiency.
2. Alstom Technical Papers. Urbalis Solutions: Autonomous Control and AI in Modern Metro Systems, 2024.
3. CRRC Corporation. White Paper on Smart Rail Transit: Big Data and AI Applications in Traction Drives, 2024.
4. IEEE Xplore**.** Artificial Intelligence in Electric Traction Drives: A Review of Deep Learning and Fuzzy Logic Applications. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023.
5. ScienceDirect**.** Energy-efficient control strategies for high-speed trains using Model Predictive Control (MPC), 2023.
6. Bose, B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Second Edition, Pearson Education, 2021. (Vektor boshqaruv va AI bo‘yicha fundamental manba).
7. Ivanov, I. I. Интеллектуальное управление тяговыми двигателями: проблемы и решения. Электротехника, №4, 2022.
8. BYD Global. Smart Energy Management Systems (EMS) for Electric Buses: Technical Specifications, 2024.
9. UITP (International Association of Public Transport). Statistics and Innovations in Metro Automation (GoA4), 2023.