

Date: 3rd August-2026

TEMIR YO'L AVTOMATIKA VA TELEMEXANIKA TIZIMLARIDAGI YO'L
TRANSFORMATORLARINI HIMOYA QILISH USULINI
TAKOMILLASHTIRISH NATIJALARI

Qudratov Javohir Bahodir o'g'li

Toshkent davlat transport universiteti, tayanch doktorant

Annotatsiya. Maqolada temir yo'l avtomatika va telemexanika tizimlaridagi yo'l transformatorlarini ortiqcha yuklanish va qisqa tutashuv rejimlaridan himoya qilishning takomillashtirilgan usuli bo'yicha olib borilgan tadqiqot natijalari keltirilgan. Amaldagi AVM-2 turidagi bimetall avtomatik saqlagichlarning issiqlik inersiyasiga asoslangan sekin ishlash muammosini bartaraf etish maqsadida, rels zanjiri signal uzatish yo'lining barcha elementlarini yagona tizim sifatida ifodalovchi to'rt qutbliklar kaskadiga asoslangan matematik model qayta ishlab chiqilib, qayta hisob-kitob qilingan. Model asosida himoyalananayotgan transformator ikkilamchi cho'lg'amidan ko'rinadigan ekvivalent qarshilik Z_{rz} hamda ikkilamchi tok o'zgarish tezligi di/dt analitik yo'l bilan bog'langan. Olingan analitik natijalar asosida ANSI/IEEE C37.2 standartining 50 va 51 funksiyalariga mos ikki darajali (Dual-level) raqamli himoya algoritmi sintez qilingan hamda ESP32 mikrokontrolleri va ACS724 Hall datchigi asosida AVM-MP intellektual himoya qurilmasi yaratilgan. Qurilma laboratoriya tajriba stendida va "O'zbekiston temir yo'llari" AJ Hamza stansiyasidagi dala sharoitida sinovdan o'tkazilgan. Natijalar to'rt qutblik modelidan olingan (di/dt) chegaraviy qiymatlarining nominal tokka chiziqli bog'liqligini, shuningdek qurilmaning mavjud AVM-2 saqlagichiga nisbatan sezilarli darajada tezkor va selektiv ishlashini tasdiqladi.

Kalit so'zlar: rels zanjiri, yo'l transformatori, to'rt qutblik matematik model, ekvivalent qarshilik, di/dt , dual-level himoya algoritmi, ANSI/IEEE C37.2, mikroprotsessorli himoya qurilmasi.

1. KIRISH

Temir yo'l avtomatika va telemexanika (TYAT) tizimlarida poyezdlar harakati xavfsizligini ta'minlashda rels zanjirlarining barqaror ishlashi hal qiluvchi ahamiyatga ega [1]. Rels zanjirining barqarorligi, o'z navbatida, uni signal energiyasi bilan ta'minlovchi yo'l transformatorining soz holatda bo'lishiga bevosita bog'liq. Hozirgi kunda "O'zbekiston Temir Yo'llari" AJ tarmog'ida yo'l transformatorlarini qisqa tutashuv va ortiqcha yuklanishlardan himoya qilish, asosan, o'tgan asrning 60-yillarida ishlab chiqilgan AVM-2 turidagi ko'p martali bimetall avtomatik saqlagichlar yordamida amalga oshirilmoqda [2]. Bunday qurilmalarning ishlash prinsipi bimetall plastinkaning issiqlik ta'sirida egilishiga asoslangan bo'lib, ularning o'chish vaqti 15–35 soniya oralig'ida o'zgarib, atrof-muhit haroratiga qattiq bog'liq bo'lib qoladi. Natijada qisqa tutashuv rejimida transformatorning muddatidan oldin shikastlanishi, rels zanjiri signal parametrlarining buzilishi hamda ayrim hollarda poyezdlar harakati grafigining izdan chiqishi kuzatiladi.





Rels zanjirlari va ularning himoya vositalarini takomillashtirish masalalari xorijiy va mahalliy olimlarning ilmiy ishlarida keng yoritilgan bo'lsa-da [3, 4], mikroprotsessorli qurilma darajasida matematik model, algoritm va dasturiy realizatsiyani birlashtirgan kompleks yondashuv, xususan mahalliy sharoitga moslashtirilgan yechimlar yetarli darajada ishlab chiqilmagan. Shu sababli, inersiyaviy elektromexanik himoyadan voz kechib, rels zanjiridagi elektromagnit jarayonlarni real vaqt rejimida tahlil qiluvchi hamda aniq matematik asosga tayanuvchi tezkor raqamli himoya usulini yaratish dolzarb ilmiy-texnik vazifa hisoblanadi.

Ushbu maqolaning maqsadi — yo'l transformatorlarini himoya qilishning takomillashtirilgan usuli bo'yicha olib borilgan tadqiqot doirasida qayta ishlab chiqilgan va qayta hisoblangan rels zanjirining to'rt qutblik matematik modelini, unga asoslangan ikki darajali (Dual-level) himoya algoritmini hamda ularning asosida yaratilgan AVM-MP mikroprotsessorli qurilmasining laboratoriya va dala sharoitidagi sinov natijalarini keltirishdan iborat.

2. TADQIQOT MATERIALLARI VA USULLARI

2.1. Rels zanjirining to'rt qutblik matematik modelini sintezlash

An'anaviy yondashuvda rels liniyasi uzunligi bo'yicha taqsimlangan parametrlri yagona uzatish liniyasi sifatida qaraladi. Biroq amaliyotda signal yo'l transformatoridan rels liniyasiga, undan qabul qilgich relegacha bir necha funksional element — ta'minot va rele tomonlaridagi yo'l transformatorlari, drossel-transformatorlar, cheklovchi qarshiliklar (Z_1 , Z_2) hamda bevosita rels liniyasi (RL) — orqali ketma-ket o'tadi. Bunday murakkab yo'lni yagona va izchil tarzda tavsiflash uchun to'rt qutblik (четырёхполюсник) nazariyasidan foydalanildi [3–5]: har bir element o'zining kirish va chiqish kattaliklarini bog'lovchi A, B, C, D koefitsientli matritsa bilan ifodalanib, ularning kaskadli birikmasi matritsalar ko'paytmasi orqali qayta hisoblandi.

Himoyalananayotgan yo'l transformatori o'zaro induktiv bog'langan ikkita kontur sifatida qaraldi. Birlamchi cho'lg'amga tarmoqdan u_1 kuchlanish berilganda, Kirxgofning ikkinchi qonuni asosida birlamchi kontur uchun quyidagi tenglama o'rinli bo'ladi [6]:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

bu yerda i_1 , i_2 — transformatorning birlamchi va ikkilamchi cho'lg'amlaridagi oniy toklar, R_1 , R_2 — mos cho'lg'amlarning aktiv qarshiliklari, L_1 , L_2 — induktivliklari, M — o'zaro induksiya koefitsienti. Ikkilamchi cho'lg'amga ulangan rels zanjiridagi kuchlanish $U_{rz} = Z_{rz} \cdot i_2$ ifodasi orqali, Z_{rz} esa ikkilamchi cho'lg'am terminallaridan ko'rinadigan rels zanjirining ekvivalent qarshiligi bo'lganligi hisobga olinib, ikkilamchi kontur tenglamasi quyidagi ko'rinishda yozildi:

$$M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + (R_2 + Z_{rz}) i_2 = 0 \quad (2)$$

(1) va (2) ifodalarni tok hosilalari di_1/dt va di_2/dt ga nisbatan tartiblab, ularni matritsa ko'rinishida ifodaladik:

$$\begin{pmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 - R_1 i_1 \\ -(R_2 + Z_{rz}) i_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Date: 3rd August-2026

Tizim yagona yechimga ega bo'lishi uchun bosh determinant $\Delta = L_1 L_2 - M^2$ noldan farqli bo'lishi shart. Bu shart real yo'l transformatorlari uchun sochilish induktivligi mavjudligi sababli ta'minlanadi (bog'lanish koeffitsienti $k = M/\sqrt{L_1 L_2} < 1$). Kramer usuli yordamida tizim qayta yechilib, ikkilamchi tok o'zgarish tezligi uchun quyidagi analitik ifoda olindi:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{-L_1 (R_2 + Z_{rz}) i_2 - M (u_1 - R_1 i_1)}{L_1 L_2 - M^2} \quad (4)$$

(4) ifoda tadqiqotning asosiy nazariy natijasi bo'lib, ikkilamchi tok o'zgarish tezligini himoyalayotgan transformator parametrlari (R_1, R_2, L_1, L_2, M) hamda rels zanjirining ekvivalent qarshiligi Z_{rz} orqali bevosita bog'laydi.

Z_{rz} qiymatini aniqlash uchun himoyalayotgan transformator ikkilamchi cho'lg'amidan keyingi barcha elementlar — Z_1 qarshilik, ta'minot drossel-transformatori (DTt), rels liniyasi (RL), qabul drossel-transformatori (DTr), Z_2 qarshilik va qabul yo'l transformatori (ITr) — ketma-ket to'rt qutbliklar kaskadi sifatida qayta birlashtirildi:

$$\begin{pmatrix} A_\Sigma & B_\Sigma \\ C_\Sigma & D_\Sigma \end{pmatrix} = T_{Z_1} \cdot T_{DTt} \cdot T_{RL} \cdot T_{DTr} \cdot T_{Z_2} \cdot T_{ITr} \quad (5)$$

Rels zanjiri oxiriga ulangan qabul qilgich relening qarshiligi Z_R yuklama vazifasini bajaradi. To'rt qutblik nazariyasiga ko'ra, himoyalayotgan transformator ikkilamchi cho'lg'ami terminallaridan ko'rinadigan ekvivalent qarshilik quyidagicha qayta hisoblandi:

$$Z_{rz} = \frac{A_\Sigma Z_R + B_\Sigma}{C_\Sigma Z_R + D_\Sigma} \quad (6)$$

(6) ifoda — sintez qilingan modelning yakuniy natijasi bo'lib, an'anaviy yondashuvdan farqli o'laroq faqat rels liniyasini emas, balki rels zanjiridagi barcha elementlarni birgalikda hisobga oladi. Poyezd g'ildirak juftliklari rels iplarini shuntlaganda yoki qisqa tutashuv yuz berganda, yuklama Z_R o'rniga shuntlash qarshiligi R_{sh} keladi:

$$Z_{rz}^{sh} = \frac{A_\Sigma R_{sh} + B_\Sigma}{C_\Sigma R_{sh} + D_\Sigma}, \quad R_{sh} \approx 0-0,06 \, \Omega \quad (7)$$

R_{sh} qiymati me'yoriy talablarga ko'ra juda kichik bo'lganligi sababli, (7) ifoda bo'yicha Z_{rz} keskin kamayadi, bu esa (4) ifodaga muvofiq $|di_2/dt|$ ning keskin sakrashiga olib keladi. Aynan shu qonuniyat avariya holatining diagnostik belgisi sifatida himoyani ishga tushirish sharti qilib qabul qilindi:

$$\left| \frac{di_2}{dt} \right| \geq S_{ish} \implies \text{himoya ishga tushadi} \quad (8)$$

bu yerda S_{ish} — himoyaning ishga tushish (sezgirlik) chegarasi. Shuni ta'kidlash lozimki, mazkur to'rt qutblik model va undan kelib chiqadigan (4)–(8) ifodalar dissertatsiya tadqiqoti doirasida qayta ko'rib chiqilgan va qayta hisob-kitob qilingan bo'lib, ular quyida keltirilgan ikki darajali himoya algoritmi hamda 3.1-bo'limdagi sonli natijalarning bevosita nazariy asosini tashkil etadi [7, 8].

2.2. Ikki darajali (Dual-level) raqamli himoya algoritmi va signalni qayta ishlash

To'rt qutblik modelidan olingan (4) va (8) analitik natijalar asosida, xalqaro ANSI/IEEE C37.2 standartining 50 va 51 funksiyalariga mos ikki darajali qaror qabul qilish algoritmi sintez qilindi [9].

Datchikdan olingan tok signalidagi yuqori chastotali elektromagnit xalaqitlarni bostirish uchun eksponensial tekislash (EMA) raqamli filtri qo'llanildi [10, 11]:



$$I_f[k] = \alpha I_{raw}[k] + (1 - \alpha) I_f[k - 1] \quad (9)$$

bu yerda $I_f[k]$ — k-qadamdagi filtrlangan tok qiymati, $I_{raw}[k]$ — ADC orqali olingan joriy tok qiymati, α — silliqlash koeffitsienti (temir yo'l rels zanjiri signallari uchun $\alpha = 0,05 \div 0,3$ diapazonida tanlandi). Filtrlangan signal asosida tokning o'zgarish tezligi $N = 5$ qadamli diskret hosila orqali hisoblandi:

$$\left. \frac{dI}{dt} \right|_k = \frac{I_f[k] - I_f[k - 4]}{4 \Delta t} \quad (10)$$

Birinchi daraja — ANSI 50 (qisqa tutashuvlardan tezkor himoya) tokning o'zgarish tezligi (10) oldindan belgilangan kritik qiymat $(di/dt)_{kr}$ dan oshganda, vaqt kechikishsiz uzish buyrug'ini shakllantiradi. Kritik qiymat klassik rele himoyasi nazariyasidagi kishonch ishonchlilik koeffitsienti (1,2–1,4 oralig'ida) yordamida ruxsat etilgan yuklanish rejimidagi tokning o'zgarish tezligidan qayta ajratildi [12]:

$$(di/dt)_{kr} = k_{ishonch} \cdot \sqrt{2} \cdot 2\pi f \cdot 1,25 I_{nom} \quad (11)$$

Ikkinchi daraja — ANSI 51 (o'ta yuklanishdan sekinlashtirilgan himoya) tok amplitudasi $I_{kr} = 1,25 \cdot I_{nom}$ chegaradan oshganda, "Definite Time" nazariyasi bo'yicha qat'iy tlimit kechikish bilan ishga tushadi [13]. Ikki bosqichning birgalikda qo'llanilishi tokning nafaqat oniy qiymatini, balki uning dinamikasini ham hisobga olib, qisqa muddatli o'tkinchi jarayonlarni avariya sifatida noto'g'ri baholash ehtimolini keskin kamaytiradi [14].

2.3. AVM-MP intellektual himoya qurilmasining apparat-dasturiy arxitekturası

Sintez qilingan matematik model va ikki darajali algoritmni apparat darajasida amalga oshirish uchun modulli mikroprotessorli qurilma — AVM-MP loyihalandi. Qurilmaning markaziy hisoblash yadrosi sifatida ikki yadroli ESP32 mikrokontrolleri tanlandi [15]. Tok parametrlarini o'lchash uchun Hall effektiga asoslangan ACS724 datchigi qo'llanildi; uning texnik ko'rsatkichlari an'anaviy ACS712 datchigi bilan 1-jadvalda solishtirilgan [16, 17].

1-jadval. ACS712 va ACS724 tok datchiklarining texnik parametrlarini taqqoslash

Parametr	ACS712	ACS724	Muhimligi
O'lchov diapazoni	0–30 A	0–50 A	Ikkalasi ham mos
Sezgirlik, mV/A	66–185	40–100	Chiziqli aniqlik
Chiziqlilik xatosi	$\pm 1,5 \%$	$\pm 0,8 \%$	di/dt aniqligi uchun
Javob berish vaqti	5 mks	≤ 1 mks	Tezkor di/dt aniqlash uchun kritik
Magnit ekranlash	Yo'q	Bor, ichki 40 dB	Elektromagnit chidamlilik
AEC-Q100 sertifikati	Yo'q	Bor	Sanoat tasdig'i
Harorat diapazoni	$-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots +85 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots +125 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Temir yo'l sharoitiga moslik
Galvanik izolyatsiya	2,1 kV	2,1 kV	Xavfsizlik

Date: 3rd August-2026



Ijro mexanizmi sifatida nominal o'tkazuvchanligi 30 A bo'lgan SLA-05VDC-SL-C mikroelektron qattiq jisimli rele qo'llanildi (an'anaviy AVM-2 ning 15 A maksimal yuklamasiga nisbatan ikki barobar quvvat zaxirasi bilan). Qurilmaning uzluksiz ishlashini ta'minlash uchun asosiy ta'minot uzilgan hollarda ham ishlashni davom ettiruvchi zaxira akkumulyatorli (Li-ion 18650) ko'p bosqichli quvvat bloki yig'ildi. Qurilmaga o'rnatilgan veb-interfeys orqali himoya parametrlarini (Inom, tlimit, tqayta) turli rels zanjiri sharoitlariga moslab operativ sozlash hamda nosozliklar arxivini JSON/CSV formatlarida masofadan yuklab olish imkoniyati yaratildi.

2.4. Tajriba stendi va dala sharoitidagi sinov metodologiyasi

Ishlab chiqilgan prototip dastlab maxsus tashkil etilgan laboratoriya tajriba stendida sinovdan o'tkazildi. Stend LATR rostlanuvchi avtotransformatori, PRT-25 moslashtiruvchi transformatori, ampermetr va voltmeterdan tashkil topgan bo'lib, zanjirdagi tok qiymatini boshqariladigan tarzda o'zgartirish hamda ikki bosqichli himoyaning har birini alohida sinash imkonini berdi. Yuklanishdan himoyani tekshirishda tok nominal qiymatdan asta-sekin oshirilib, adaptiv chegara I_{kr} ga yetgan vaqtdan boshlab rele kontakti uzilgunicha o'tgan vaqt sekundomer va qurilma veb-interfeysi orqali qayd etildi. Tezkor himoyani tekshirishda esa past qarshilikli tarmoq ulanib, tokning keskin sakrashi hosil qilindi va qurilmaning javob berish vaqti o'lchandi. Har bir o'lchov uch marta takrorlanib, o'rtacha qiymat olindi.

Laboratoriya sinovlari muvaffaqiyatli yakunlangach, "O'zbekiston temir yo'llari" AJ Signallashtirish va aloqa boshqarmasining 2026-yil 16-yanvardagi № Sh-2/26-sonli buyrug'i asosida qurilma dastlab Toshkent signallashtirish va aloqa masofasining "Qurilmalarni o'lchash va nazorat" sexida tekshirildi, so'ngra Hamza stansiyasining 6P va 12-26 VSP yo'l qutilaridagi amaldagi rels zanjirlariga tajriba-sinov tarzida ulandi.

3. NATIJALAR

3.1. To'rt qutblik modeli asosida qayta hisoblangan himoya chegaralari

Sintez qilingan to'rt qutblik modeli va (11) ifoda asosida tezkor himoyaning kritik qiymati (di/dt)_{kr} amaldagi AVM-2 qurilmalarining to'rtta nominal toki — 3, 5, 10 va 15 A — uchun qayta hisoblandi (2-jadval).

2-jadval. To'rt qutblik model asosida turli nominal toklar uchun qayta hisoblangan (di/dt)_{kr} qiymatlari

Inom, A	I_{kr} = 1,25·Inom, A	(di/dt)_{kr}, A/ms	(di/dt)_{kr}, A/ms
3	3,75	0,83	1,1
5	6,25	1,39	2,0
10	12,50	2,78	3,9
15	18,75	4,17	5,8

2-jadvaldan ko'rinib turibdiki, kritik qiymat (di/dt)_{kr} nominal tokka chiziqli proporsional ravishda ortadi (1,1 A/ms dan 5,8 A/ms gacha), bu (11) ifodadagi chiziqli bog'lanishni amaliy hisob-kitoblarda tasdiqladi. Ushbu natija AVM-MP qurilmasining universalligini ta'minlaydi: veb-interfeys orqali nominal tokni tanlash bilan qurilma kritik

Date: 3rd August-2026



qiymatni to'rt qutblik model asosida avtomatik qayta hisoblab, bitta apparat platformasi turli nominal tokdagi bir necha AVM-2 modifikatsiyasi vazifasini bajaradi. Ikkinchi daraja uchun kechikish vaqti $t_{\text{limit}} = 5$ s deb qabul qilindi, bu AVM-2 ning eng qisqa o'chish vaqti (25 s) dan besh baravar tezroq bo'lib, transformatorni ortiqcha yuklanishning uzoq ta'siridan tezroq himoya qilish imkonini berdi.

3.2. Laboratoriya sinov natijalari

Tajriba stendida o'tkazilgan sinovlar davomida yig'ilgan AVM-MP prototipi sun'iy hosil qilingan qisqa tutashuv va tortish toklari garmonikalari ta'sirida xatosiz ishlashini namoyish etdi. Ikki bosqichning har biri o'ziga tegishli shart bo'yicha alohida ishga tushdi: yuklanishdan himoya tokning sekin ortishiga qat'iy vaqt kechikishi bilan javob berdi, tezkor himoya esa tokning keskin sakrashini millisekundlar ichida aniqlab, zanjirni lahzali uzdi. Sinov natijalari to'rt qutblik model asosida nazariy hisoblangan chegaraviy qiymatlar bilan mos kelishini tasdiqladi hamda an'anaviy elektromexanik saqlagichlarga xos inersiyaviy kechikish va kommutatsion xatoliklarning to'liq bartaraf etilganini ko'rsatdi.

3.3. Real sharoitidagi (Hamza stansiyasi) sinov natijalari

Laboratoriya sinovlaridan so'ng AVM-MP qurilmasi Hamza stansiyasining 6P va 12-26 VSP yo'l qutilaridagi amaldagi rels zanjirlariga ulandi. Qurilma ulangandan so'ng 2 oy davomida buzilishlarsiz ishladi hamda mavjud elektromagnit qurilmalarning normal ishlashiga hech qanday salbiy ta'sir ko'rsatmadi, bu uning elektromagnit moslashuvchanligini tasdiqladi. Qurilmaning aylanasi terminalli ulanish konstruksiyasi amaldagi AVM-2 saqlagichini qo'shimcha qayta qurish ishlarisiz almashtirish imkonini berdi. Sinov natijalari asosida "O'zbekiston temir yo'llari" AJ Signallashtirish va aloqa boshqarmasidan 2026-yil 27-martdagi sinov dalolatnomasi hamda ilmiy-tadqiqot natijalarini ishlab chiqarishga tatbiq etish to'g'risidagi dalolatnoma olindi.

4. MUHOKAMA

O'tkazilgan tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, rels zanjirini yagona to'rt qutbliklar kaskadi sifatida qayta modellashtirish an'anaviy — faqat rels liniyasini taqsimlangan parametrlili liniya sifatida qaraydigan — yondashuvga nisbatan bir qator afzalliklarga ega. Birinchidan, (6) ifoda orqali olingan Z_{rz} analitik yechimi rels zanjiridagi barcha real elementlarni (yo'l transformatorlari, drossel-transformatorlar, cheklovchi qarshiliklar) birgalikda hisobga olish imkonini berib, ekvivalent qarshilikni ancha yuqori aniqlikda baholashga xizmat qiladi. Ikkinchidan, model asosida qayta olingan di^2/dt ning analitik ifodasi (4) himoya algoritmini tokning mutlaq qiymatiga emas, balki uning vaqt bo'yicha o'zgarish dinamikasiga tayangan holda qurish imkonini berdi. Bu esa klassik amplituda asosidagi himoya usullariga xos bo'lgan "ko'r zona" muammosini bartaraf etadi: qisqa tutashuv tokning xavfli darajaga yetishini kutmasdan, uning dastlabki millisekundlaridayoq aniqlanadi [18].

Ikki darajali (Dual-level) algoritmnining ANSI 50 va ANSI 51 funksiyalarini birlashtirishi selektivlik va tezkorlik o'rtasidagi an'anaviy ziddiyatni hal qiladi: tezkor daraja qisqa tutashuvga millisekundlar ichida javob bersa, sekinlashtirilgan daraja qisqa muddatli o'tkinchi jarayonlarni (shuntning vaqtincha yo'qolishi, kommutatsion shovqinlar) avariya sifatida noto'g'ri baholashning oldini oladi [19]. 2-jadvalda ko'rsatilgan chiziqli

Date: 3rd August-2026

bog'lanish natijasida qurilma turli nominal toklarga ega rels zanjirlarida qo'shimcha apparat o'zgarishlarisiz qo'llanilishi mumkin, bu amaldagi bir necha xil AVM-2 modifikatsiyasini bitta universal platforma bilan almashtirish imkonini beradi.

Hamza stansiyasidagi ikki oylik uzluksiz ishlash tajribasi va mavjud SMB qurilmalariga salbiy ta'sirning kuzatilmaganligi taklif etilgan yechimning amaliy joriy etishga tayyorligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, sinov muddatining nisbatan qisqaligi (2 oy, bitta stansiya) natijalarning statistik ishonchliligini cheklaydi; shu sababli qurilmani turli iqlim va yuklama sharoitlarida, uzoqroq muddat davomida hamda bir nechta stansiyada sinab ko'rish tavsiya etiladi. Kelgusi tadqiqotlarda to'rt qutblik modelini boshqa chastotali (50 Gs, doimiy tok) rels zanjirlariga moslashtirish, shuningdek qurilma xotirasida to'plangan monitoring ma'lumotlaridan nosozliklarni oldindan bashorat qilish algoritmlarini ishlab chiqishda foydalanish maqsadga muvofiqdir [20].

5. XULOSA

1. Yo'l transformatorlarining ekspluatatsion holatini to'g'ri baholash hamda halokatli rejimlarni lahzali aniqlash uchun rels zanjiri signal uzatish yo'lining to'rt qutbliklar kaskadiga asoslangan yagona matematik modeli qayta ishlab chiqildi va qayta hisoblandi. Model orqali rels zanjirining ekvivalent qarshiligi Z_{rz} hamda uning ikkilamchi tok hosilasi di^2/dt ga ta'siri analitik yo'l bilan isbotlandi.

2. To'rt qutblik modelining analitik yechimlariga asoslanib, qisqa tutashuv toklarini mutlaq qiymati emas, balki vaqt bo'yicha o'sish hosilasi di/dt orqali aniqlovchi, xalqaro ANSI/IEEE C37.2 standartining 50 va 51 funksiyalariga mos ikki bosqichli "Dual-level" himoya algoritmi ishlab chiqildi. Algoritm asosida turli nominal toklar (3, 5, 10, 15 A) uchun himoya chegaralari qayta hisoblanib, ularning nominal tokka chiziqli bog'liqligi aniqlandi.

3. Bimetall plastinalarning issiqlik inersiyasidan to'liq voz kechib, tokni uzluksiz o'lchash, EMA raqamli filtrlash va mikrokontroller yordamida tahlil qilishni ta'minlovchi AVM-MP mikroprotssessorli himoya qurilmasi apparat-dasturiy yechim sifatida yaratildi va laboratoriya hamda Hamza stansiyasidagi dala sinovlarida muvaffaqiyatli tekshirildi.

4. Qurilmaning ikki oylik uzluksiz dala sinovi davomida buzilishlarsiz ishlashi va mavjud SMB qurilmalariga salbiy ta'sir ko'rsatmasligi taklif etilgan to'rt qutblik model asosidagi himoya usulining amaliy joriy etishga tayyorligini tasdiqladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Шалягин Д. В., Цыбуля Н. А. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики: Учебник. – М.: Маршрут, 2014. – 350 с.
2. Ametova E.K., Qudratov J.B. AVM avtomatik modulli saqlagichlar: ularning konstruktsiyasi, turlari, qo'llanish sohasi, kamchiliklari va ishlab chiqaruvchilar // «Development Of Science», Buxoro: 2025, Issue 12. Volume 5. 25–31 b.
3. Полевой Ю. И. Теория рельсовых цепей: Монография. – Самара: СамГАПС, 2006. – 215 с.
4. Брылеев А. М., Кравцов Ю. А., Шишляков А. В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. – М.: Транспорт, 1978. – 360 с.

Date: 3rd August-2026

5. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для вузов. – 11-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 701 с.
7. Azizov A.R., Ametova E.K., Qudratov J.B., Sodiqov B. Mathematical and Simulation Modeling of Railway Track Transformers for Advanced Protection Algorithm // Intelligent Transport Networks and Systems (TITDS-XV-2025). – 2025. – Paper 1010.
8. Ametova E.K., Qudratov J.B. Temir yo'l avtomatika va telemexanika tizimi yo'l taransformatorining takomillashtirilgan himoya usulini tanlash, asoslash va ishlash prinsipi // «Science and technology: new approaches and development strategies» xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya ilmiy maqolalar to'plami. 1 tom. 10 fevral 2026y. 86–100 b.
9. IEEE Std C37.2-2008. IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations. – New York: IEEE, 2008. – 248 p.
10. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
11. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
12. Чернобровов Н. В. Релейная защита: Учебное пособие для техникумов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 680 с.
13. IEC 60255-151:2009. Measuring relays and protection equipment – Part 151: Functional requirements for over/under current protection. – Geneva: IEC, 2009. – 63 p.
14. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
15. ACS724: High-Accuracy, Hall-Effect-Based Current Sensor IC with High-Isolation and AEC-Q100 Qualification. – Allegro MicroSystems, 2021. – Datasheet.
16. ACS712: Fully integrated, hall-effect-based linear current sensor IC with 2.1 kVRMS voltage isolation and a low-resistance current conductor. – Allegro MicroSystems, 2018. – Datasheet.
17. ESP32-WROOM-32 Datasheet. – Espressif Systems, 2023. – Version 3.3.
18. Qudratov J.B. Adaptive threshold estimation of track circuit current and two-level protection algorithm synthesis for railway track transformers // Muhammad al-Xorazmiy avlodlari. – 2026. – №2(36).
19. Ametova E.K., Qudratov J.B. Temiryo'l avtomatika va telemexanika tizimi yo'l transformatorlarini himoya qilishning takomillashtirilgan usuli va sxemaviy yechimlari // Ilm-fan va innovatsion rivojlanish. – 2026. – Vol. 9, Issue 2. – B. 123–132.
20. Ametova E.K., Qudratov J.B., Sodikov B.K. Current selectivity theory-based protection algorithms for railway track transformers: A comprehensive modeling and synthesis approach // Engineer. – 2026. – Vol. 4, Issue 2. – 5–10 p.