



Контакт тarmog'i konsollarining burchak siljishini avtomatik nazorat qilish: elektromagnit o'zgartirgichlar asosida temir yo'l tortish elektr ta'minoti ishonchliligini oshirish

Sulton F. Amirov^{1,a)}, Javhar S. Fayzullaev¹

^{1a)} DSc, prof., Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, 100167, O'zbekiston; sulton.amirov@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7212-3438>

¹ DSc, dots., Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, 100167, O'zbekiston; javhar2019@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-8921-189X>

Dolzarbli: elektrlashtirilgan temir yo'llarda tortish elektr ta'minotining uzluksizligi kontakt tarmog'i elementlarining texnik holatiga bevosita bog'liq. Tayanch konsolning burchak holati me'yordan chetlanganda kontakt simi bilan tok qabul qilgichning o'zaro ta'sir sharoiti yomonlashadi, elementlarning shikastlanishi va elektr ta'minotining rejadan tashqari uzilishi xavfi ortadi. Davriy ko'riklar oralig'ida bunday o'zgarishlarning nazoratsiz qolishi konsolning burchak siljishini avtomatik nazorat qiluvchi birlamchi o'zgartirgichlarni ishlab chiqish zaruratini belgilaydi.

Maqsad: kontakt tarmog'i konsollarining burchak siljishini avtomatik nazorat qilish uchun elektromagnit o'zgartirgichlarni ishlab chiqish, ularning texnik va metrologik ko'rsatkichlarini mavjud o'zgartirgich bilan qiyosiy tadqiq etish hamda amaldagi kontakt tarmog'i uchastkasida qo'llashning hisobiy iqtisodiy samarasini baholash.

Usullari: elektromagnit induksiya va o'zaro induktiv bog'lanish nazariyasi, statik o'zgartirish tavsiflarini eksperimental aniqlash va qiyosiy tahlil qilish, metrologik ko'rsatkichlarni (sezgirlik, keltirilgan xatolik, nochiqlik) baholash hamda ekspluatatsion xarajatlar asosida iqtisodiy samarani hisoblash usullari qo'llanildi.

Natijalar: taklif etilgan EM-1 va EM-2 o'zgartirgichlarining sezgirligi 0,020 V/gradusni tashkil etib, mavjud o'zgartirgichnikidan (0,005 V/gradus) 4 baravar yuqori. O'lchash xatoligi 2,0% dan mos ravishda 1,5% va 1,0% gacha kamaydi. EM-2 da 0–90° o'lchash diapazoni saqlangan holda statik tavsifning nochiqlikligi 2,5% dan 0,1% gacha, massa esa 1,2 kg dan 0,6 kg gacha kamaytirildi. O'zgartirgich amaldagi kontakt tarmog'i uchastkasida joriy etildi; qabul qilingan ekspluatatsion ma'lumotlar bo'yicha joriy etishning birinchi yili uchun hisobiy iqtisodiy samara 107 548 000 so'mni tashkil etdi.

Kalit so'zlar: kontakt tarmog'i, konsol, burchak siljishi, elektromagnit o'zgartirgich, avtomatik nazorat, metrologik tavsiflar, tortish elektr ta'minoti.

For citation: Amirov S.F.,

Fayzullaev J.S. Automatic monitoring of the angular displacement of catenary cantilevers: improving the reliability of railway traction power supply based on electromagnetic transducers. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3(1), pp. 16–28.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23464378>

Received: 15.03.2026

Revised: 10.04.2026

Accepted: 23.05.2026

Published: 19.10.2026

Copyright: © Sulton F. Amirov, Javhar S. Fayzullaev, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Автоматический контроль углового смещения консолей контактной сети: повышение надёжности тягового электроснабжения железных дорог на основе электромагнитных преобразователей

Султон Ф. Амиров^{1,a)}, Жавхар С. Файзуллаев¹

^{1a)} DSc, профессор, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, 100167, Узбекистан; sulton.amirov@bk.ru <https://orcid.org/0000-0001-7212-3438>

¹ DSc, доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, 100167, Узбекистан; javhar2019@mail.ru <https://orcid.org/0009-0007-8921-189X>

Актуальность: бесперебойность тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог непосредственно зависит от технического состояния элементов контактной сети. Отклонение углового положения поддерживающей консоли от нормативного ухудшает условия взаимодействия контактного провода и токоприёмника, повышая риск повреждения элементов и внеплановых перерывов электроснабжения. Поскольку в интервалах между периодическими осмотрами такие изменения остаются неконтролируемыми, необходима разработка первичных преобразователей для автоматического контроля углового смещения консоли.

Цель: разработка электромагнитных преобразователей для автоматического контроля углового смещения консолей контактной сети, сравнительное исследование их технических и метрологических характеристик относительно существующего преобразователя и оценка расчётного экономического эффекта применения на действующем участке контактной сети.

Методы применены теория электромагнитной индукции и взаимной индуктивной связи, экспериментальное определение и сравнительный анализ статических характеристик преобразования, оценка метрологических показателей (чувствительность, приведённая погрешность, нелинейность) и расчёт экономического эффекта по эксплуатационным затратам.

Результаты: чувствительность предложенных преобразователей ЭД-1 и ЭД-2 составила 0,020 В/градус, что в 4 раза выше, чем у существующего преобразователя (0,005 В/градус). Погрешность



измерения снижена с 2,0% до 1,5% и 1,0% соответственно. В преобразователе ЭД-2 при сохранении диапазона измерения 0–90° нелинейность статической характеристики уменьшена с 2,5% до 0,1%, а масса — с 1,2 до 0,6 кг. Преобразователь внедрён на действующем участке контактной сети; расчётный экономический эффект за первый год внедрения при принятых эксплуатационных данных составил 107 548 000 сум.

Ключевые слова: контактная сеть, консоль, угловое смещение, электромагнитный преобразователь, автоматический контроль, метрологические характеристики, тяговое электроснабжение.

Automatic monitoring of the angular displacement of catenary cantilevers: improving the reliability of railway traction power supply based on electromagnetic transducers

Sulton F. Amirov^{1,a)}, Javhar S. Fayzullaev¹

^{1a)} DSc, Professor, Tashkent State Transport University, Tashkent, 100167, Uzbekistan; sulton.amirov@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7212-3438>

¹ DSc, Associate Professor, Tashkent State Transport University, Tashkent, 100167, Uzbekistan; javhar2019@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-8921-189X>

Background: the continuity of traction power supply on electrified railways depends directly on the technical condition of overhead contact line components. Deviation of a supporting cantilever from its prescribed angular position degrades pantograph–contact wire interaction and increases the risk of component damage and unplanned supply interruptions. Because such changes remain unobserved between periodic inspections, primary transducers for automatic monitoring of cantilever angular displacement are required.

Aim: to develop electromagnetic transducers for automatic monitoring of catenary cantilever angular displacement, to compare their technical and metrological characteristics with those of an existing transducer, and to estimate the economic effect of their application on an operating catenary section.

Methods: the theory of electromagnetic induction and mutual inductive coupling, experimental determination and comparative analysis of static conversion characteristics, evaluation of metrological parameters (sensitivity, full-scale error, non-linearity), and an economic-effect calculation based on operating costs were applied.

Results: the proposed ET-1 and ET-2 transducers provide a sensitivity of 0.020 V/degree, four times that of the existing transducer (0.005 V/degree). The measurement error was reduced from 2.0% to 1.5% and 1.0%, respectively. In ET-2, with the 0–90° measuring range retained, the non-linearity of the static characteristic decreased from 2.5% to 0.1% and the mass from 1.2 to 0.6 kg. The transducer was installed on an operating catenary section; under the adopted operating data, the estimated economic effect for the first year of implementation amounts to UZS 107,548,000.

Keywords: overhead contact line, cantilever, angular displacement, electromagnetic transducer, automatic monitoring, metrological characteristics, traction power supply.

1. Kirish (Introduction)

Elektrlashtirilgan temir yoʻllarda havo kontakt tarmogʻi stasionar tortish elektr taʼminoti infratuzilmasidan harakatlanuvchi tarkibga energiya uzatishning yakuniy boʻgʻini hisoblanadi. Shu bois kontakt tarmogʻi elementlarining texnik holati tok qabul qilishning uzluksizligini va, pirovardida, temir yoʻl transportining ekspluatatsion ishonchligini belgilovchi asosiy omillardan biridir [1–3].

Tok qabul qilish sifati tok qabul qilgich bilan kontakt simining mexanik oʻzaro taʼsiri orqali aniqlanadi. Kontakt osmasining mexanik va geometrik parametrlari meʼyordan chetlanganda kontakt bosimining barqarorligi buziladi, bu esa kontaktning uzilishiga, elektr yoyining hosil boʻlishiga, kontakt simi va tok qabul qilgich elementlarining jadal yeyilishi hamda shikastlanishiga olib keladi [2, 3]. Ekspluatatsiya jarayonida kontakt tarmogʻi elementlariga shamol yuklamalari, atrof-muhit haroratining oʻzgarishi va simlarning taranglik kuchlari taʼsir etadi, konstruktiv elementlar esa vaqt oʻtishi bilan eskiradi.

Kontakt tarmogʻiga texnik xizmat koʻrsatish anʼanaviy ravishda davriy koʻriklar va maxsus diagnostika tadbirlariga asoslanadi. Bunday yondashuv yuzaga kelgan nosozliklarni aniqlash imkonini bersa-da, koʻriklar oraligʻida sodir boʻladigan oʻzgarishlar toʻgʻrisida uzluksiz axborot bermaydi. Shu munosabat bilan soʻnggi yillardagi tadqiqotlarda diagnostik axborotni oʻz vaqtida olish va profilaktik xizmat koʻrsatish boʻyicha qarorlarni asoslash vositasi sifatida avtomatlashtirilgan, obyektning amaldagi texnik holatiga asoslangan monitoringga tobora katta eʼtibor qaratilmoqda [1, 4–6, 11, 12].

Mavjud monitoring yondashuvlari optik koʻrik va tasvirlarni qayta ishlash, uch oʻlchamli geometrik tahlil, tebranishlarni oʻlchash hamda tok qabul qilgich – kontakt tarmogʻi oʻzaro taʼsiri parametrlarini kuzatishni qamrab oladi [1, 4–6, 13, 14]. Ushbu usullarning sezilarli qismi harakatlanuvchi diagnostika vositalarida amalga oshiriladi va obyekt toʻgʻrisidagi axborotni faqat

o'tish paytida beradi. Alohida tayanch tugunining, xususan konsolning holatini uzluksiz nazorat qilish masalasi esa nisbatan kam o'rganilgan.

Burchak holatini nazorat qilishda MEMS-inklinometrlar, optik enkoderlar, rezolverlar va aylanuvchi differensial transformatorlar (RVDT) keng qo'llaniladi, ularning har biri o'ziga xos afzallik va cheklavlarga ega. MEMS-inklinometrlar ixcham, kam quvvat sarflaydigan va raqamli tizimlarga integratsiyalash oson bo'lsa-da, ularning chiqish signali haroratga, uzoq muddatli drift, dinamik tezlanish va vibratsiyaga sezgir [9]. Optik enkoderlar yuqori o'lchash aniqligini ta'minlaydi, biroq ularning ishlashiga mexanik deformatsiya, harorat va vibratsiya ta'sir ko'rsatishi mumkin [10]. RVDT va rezolverlar kontaktsiz ishlashi, mexanik mustahkamligi va og'ir ekspluatatsiya sharoitlariga mosligi bilan tavsiflanadi, ammo rezolverlarda burchakni aniqlash uchun $\sin/\cos$ chiqish signallarini qo'shimcha qayta ishlash talab etiladi [9]. Induktiv va o'zgaruvchan magnit qarshilikli o'zgartirgichlar sohasida ham konstruktiv takomillashtirish davom etmoqda [15, 16, 19]. Ushbu tadqiqotda kontakt tarmog'i konsolining burchak holatini nazorat qilish uchun elektromagnit o'zgartirgich tanlangan: ED-1 va ED-2 da mexanik burchak siljishi chulg'amlar orasidagi o'zaro induktiv bog'lanishning o'zgarishi orqali kontaktsiz elektr signaliga aylantiriladi; bu esa konstruksiyani nazorat obyekti moslashtirish, og'ir ekspluatatsiya sharoitlariga mos sodda tuzilishga ega bo'lish imkonini beradi. Taklif etilgan o'zgartirgichning muqobil o'lchov vositalaridan mutlaq ustunligi da'vo qilinmaydi; biroq uning kontakt tarmog'i konsoliga moslashtirilgan konstruksiyasi va ED -2 uchun tajribada olingan ko'rsatkichlar – 0 – 90° o'lchash diapazoni, 0,020 V/gradus sezgirlik, 1,0% o'lchash xatoligi va 0,1% statik tavsif nochiqiziligi – uni konsol burchak holatini avtomatik nazorat qilish tizimining birlamchi o'lchov elementi sifatida qo'llash maqsadga muvofiqligini asoslaydi.

1-jadval. Kontakt tarmog'i konsoli burchak holatini nazorat qilish uchun burchak o'lchash texnologiyalarining qiyosiy tahlili

Table 1. Comparative analysis of angular measurement technologies for monitoring the angular position of catenary cantilever consoles

O'lchov texnologiyasi	Asosiy afzalligi	Kontakt tarmog'i uchun e'tibor talab qiladigan jihat
MEMS-inklinometr	Ixcham, arzon, integratsiya qilish oson	Harorat/uzoq muddatli drift; dinamik vibratsiya va tezlanish ta'siriga sezgirlik
Optik enkoder	Juda yuqori aniqlik va o'lchash qobiliyati	Vibratsiya, harorat va mexanik deformatsiyaga sezgir
RVDT	Kontaktsiz, mustahkam, uzoq xizmat muddati	AC qo'zg'atish va signalni qayta ishlashni talab qiladi; diapazon konstruksiyaga bog'liq
Rezolver	Mustahkam, ishonchli, og'ir muhitga mos	$\sin/\cos$ signallarini demodulyatsiya qilish va R/D o'zgartirish zarur
Taklif etilgan ED-2	Kontakt tarmog'i konsoliga moslashtirilgan; kontaktsiz elektromagnit prinsip; 0 – 90° diapazon	Harorat, vibratsiya va elektromagnit xalaqit bo'yicha uzoq muddatli ekspluatatsion sinov talab etiladi

Mazkur ishda kontakt tarmog'i tayanch konsolining burchak holati nazorat obyekti sifatida qaraladi. Konsolning loyihaviy holatdan chetlanishi kontakt osmasining geometriyasini o'zgartiradi va kontakt simi bilan tok qabul qilgichning o'zaro ta'siri uchun noqulay sharoit yuzaga keltiradi. Binobarin, vazifa nafaqat yuzaga kelib bo'lgan nosozlikni qayd etishdan, balki konsol holatidagi o'zgarishlar to'g'risida ularning dastlabki bosqichidayoq o'lchash axborotini olishdan ham iborat. Buning uchun mexanik burchak siljishini yetarli sezgirlik, aniqlik va chiziqlilik bilan bevosita elektr signaliga aylantiruvchi ixcham birlamchi o'zgartirgich talab etiladi.

Ishda ED -1 va ED -2 elektromagnit burchak siljish o'zgartirgichlari taklif etiladi; ularning konstruktiv yechimlari patentlar bilan himoyalangan [7, 8, 17, 18]. O'zgartirgichlarning ishlash prinsipi nazorat qilinayotgan konsol bilan mexanik bog'langan harakatlanuvchi elementning siljishi natijasida qo'zg'atish va o'lchash chulg'amlari orasidagi o'zaro induktiv bog'lanishning o'zgarishiga asoslangan. Tadqiqotning maqsadi – mazkur o'zgartirgichlarni ishlab chiqish, ularning texnik va metrologik ko'rsatkichlarini mavjud o'zgartirgich bilan qiyosiy tadqiq etish hamda kontakt tarmog'i konsollari holatini avtomatik nazorat qilishda qo'llashning hisobiy iqtisodiy samarasini baholashdan iborat.

2. Materiallar va usullar (Materials and methods)

Nazorat qilinadigan kattalik – kontakt tarmog'i konsolining loyihaviy holatga nisbatan burchak siljishi α . Elektromagnit o'zgartirgich ushbu mexanik kattalikni keyingi avtomatik qayta ishlash uchun yaroqli elektr chiqish signaliga aylantiradi.

Harakatlanuvchi elementning holati o'zgarganda magnit zanjirining geometriyasi va, demak, qo'zg'atish hamda o'lchash chulg'amlari orasidagi o'zaro induktiv bog'lanish o'zgaradi. O'lchash

chulg'amida induksiyanadigan elektr yurituvchi kuch elektromagnit induksiya qonuniga muvofiq aniqlanadi:

$$e_2(t) = -w_2 \frac{d\Phi_{21}(t)}{dt}, \quad (1)$$

bu yerda w_2 – o'lchash chulg'aming o'ramlar soni; Φ_{21} – qo'zg'atish chulg'ami hosil qiladigan va o'lchash chulg'ami bilan ilashgan magnit oqimi.

Qo'zg'atish toki sinusoidal bo'lganda va o'lchash chulg'ami salt ish rejimida ishlaganda chiqish kuchlanishining amplitudasi quyidagicha ifodalanadi:

$$U_{chiq}(\alpha) = \omega I_{1m} M(\alpha), \quad (2)$$

bu yerda $\omega = 2\pi f$ – qo'zg'atish tokining burchak chastotasi; I_{1m} – qo'zg'atish chulg'ami tokining amplitudasi; $M(\alpha)$ – chulg'amlar orasidagi burchak siljishiga bog'liq o'zaro induktivlik. Shunday qilib, o'zgartirish zanjiri $\alpha \rightarrow M(\alpha) \rightarrow U_{chiq}(\alpha)$ ko'rinishiga ega.

ED-1 va ED-2 da qo'llanilgan Arximed spirali qutb geometriyasi uchun ikkita ishchi havo tirqishi burchak siljishiga chiziqli bog'liq holda o'zgaradi: $\delta'(\alpha) = \delta_0 - (a_s/360^\circ)\alpha$ va $\delta''(\alpha) = \delta_0 + (a_s/360^\circ)\alpha$, bu yerda $\delta^0 - \alpha = 0$ dagi tirqish, a_s – spiral qadami; tegishli qutb va tirqish qarshiliklaridan tuzilgan ekvivalent magnit zanjiriga kontur toklar usulini qo'llash orqali [20] ikkita o'lchov diagonali orasidagi natijaviy ishchi oqim farqi $\Delta Q_\mu(\alpha)$ topiladi, demak qo'zg'atish va o'lchov chulg'amlari orasidagi o'zaro induktivlik ishchi diapazonda chiziqli bo'ladi: $M(\alpha) = w_e w_m \Delta\alpha / Z_\mu \Sigma$, bu yerda w_e va w_m – qo'zg'atish va o'lchov chulg'amlarining o'ramlar soni, $Z_\mu \Sigma$ – berk magnit zanjirining ekvivalent qarshiligi; $M(\alpha)$ ni $e_2(t) = -w_m d\Phi_{21}/dt$ ifodasiga qo'yish (2)-formulani hosil qiladi. Xuddi shu zanjir tahlili shuni ko'rsatadiki, qo'zg'atish chulg'aming o'z-induktivligi α ga o'zgarmas emas, balki kvadratik bog'liq ($L_e = w_e^2 (\Delta\alpha)^2 / Z_\mu \Sigma$), shuning uchun chulg'am ED-1 va ED-2 da qo'llanilgan 12 V kabi o'zgarmas kuchlanish manbaidan ta'minlanganda, qo'zg'atish toki I_1 nazariy jihatdan α ga bog'liq bo'lishi mumkin; ushbu bog'liqlik, demak (2)-formula asosidagi $I_1 = const$ taxminidan chetlanish, qo'zg'atish zanjiri $R \gg \omega L_e$ va $R \gg \omega M$ shartlarini qanoatlantirganda – ya'ni qo'zg'atish chulg'ami yetarlicha katta ketma-ket qarshilik orqali ta'minlanib, amalda tok manbai rejimida ishlaganda – ahamiyatsiz darajaga tushadi. Hozirgi tajriba namunalarida ushbu shart alohida tekshirilmagan, uni tasdiqlash va statik tavsif nochiziqliligiga ta'sirini baholash esa qo'zg'atish zanjirini keyingi takomillashtirish vazifasi sifatida belgilanadi.

O'zgartirichning sezgirligi statik o'zgartirish tavsifining hosilasi sifatida aniqlanadi:

$$S_\alpha = \frac{dU_{chiq}}{d\alpha} \approx \frac{\Delta U_{chiq}}{\Delta\alpha}. \quad (3)$$

(2) ifodani (3) ga qo'yib, qo'zg'atish toki amplitudasi o'zgarmas bo'lgan holda sezgirlikni o'zaro induktivlikning burchak bo'yicha o'zgarish tezligi orqali ifodalash mumkin:

$$S_\alpha = \omega I_{1m} \frac{dM}{d\alpha} = \omega \frac{d\Psi_m}{d\alpha}, \quad (4)$$

bu yerda $\Psi_m = M(\alpha) I_{1m}$ – o'lchash chulg'ami bilan ilashgan oqim ilashishi (kuchlanish va oqim ilashishi bir xil turdagi – amplituda yoki ta'sir etuvchi – qiymatlarda olinadi). (4) ifodadan ko'rinadiki, ta'minot chastotasi o'zgarmas bo'lganda sezgirlikni faqat oqim ilashishining burchak bo'yicha o'zgarish tezligini oshirish, ya'ni magnit tizimning konstruktiv yechimi hisobiga ko'tarish mumkin.

O'lchash zanjirining ishonchli ishlashi uchun $U_{chiq} = f(\alpha)$ statik o'zgartirish tavsifi ish diapazonida bir qiymatli, yetarlicha sezgir va imkon qadar chiziqli bo'lishi lozim. Shu sababli sezgirlik, o'lchash xatoligi va statik tavsifning nochiziqliligi o'zgartirichning asosiy metrologik mezonlari sifatida qabul qilindi. O'lchash xatoligi o'lchash diapazonining yuqori chegarasiga keltirilgan xatolik bilan baholandi:

$$\gamma = \frac{|\alpha_{o'lch} - \alpha_{et}|_{max}}{\alpha_N} \cdot 100\%, \quad (5)$$

bu yerda $\alpha_{o'lch}$ – o'zgartirichning chiqish signali bo'yicha aniqlangan burchak; α_{et} – burchakning etalon qiymati; α_N – o'lchash diapazonining yuqori chegarasi. Nisbiy xatolikdan farqli o'laroq, keltirilgan xatolik diapazonning boshlang'ich qismida ($\alpha \rightarrow 0$) ham chekli qiymatga ega bo'lib, turli o'zgartirichlarni o'zaro taqqoslash uchun qulaydir. Statik tavsifning nochiziqliligi tajribada olingan bog'lanishning chiziqli approksimatsiyadan eng katta og'ishi bilan baholandi:

$$\delta_{nch} = \frac{|U_{chiq} - U_{ch}|_{max}}{U_{chiq,max}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

bu yerda U_{ch} – chiziqli approksimatsiya bo'yicha chiqish kuchlanishi; $U_{chiq,max}$ – diapazonning yuqori chegarasidagi chiqish kuchlanishi. Nochiziqlilikning kamayishi kalibrflashni soddalashtiradi va chiqish signalini butun diapazonda yagona o'zgartirish koeffitsienti bilan talqin qilish imkonini beradi.

2-jadvalda keltirilgan birlamchi tajriba natijalaridan hosilaviy ko'rsatkichlarni aniqlash uchun quyidagi ifodalar qo'llanildi. Statik tavsif chiziqli deb qabul qilinganda diapazonning yuqori chegarasidagi chiqish kuchlanishi va kuchlanish bo'yicha uzatish koeffitsienti:

$$U_{chiq,max} = S_\alpha \alpha_N, \quad k_U = \frac{U_{chiq,max}}{U_t}, \quad (7)$$

bu yerda U_t – ta'minot kuchlanishi. Keltirilgan xatolikka mos keluvchi eng katta mutlaq xatolik burchak va kuchlanish birliklarida:

$$\Delta\alpha_{\max} = \frac{\gamma\alpha_N}{100\%}, \quad \Delta U_{\gamma} = S_{\alpha}\Delta\alpha_{\max}, \quad (8)$$

Nochiziqlilikka mos keluvchi eng katta og'ish kuchlanish va burchak birliklarida:

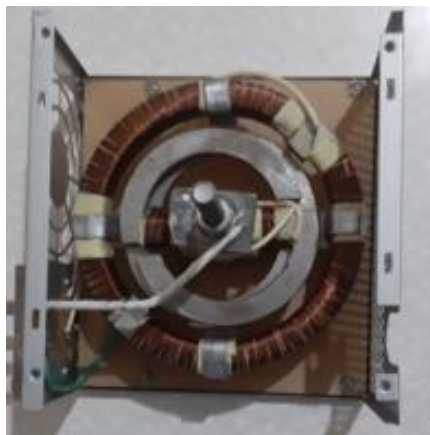
$$\Delta U_{\text{nch}} = \frac{\delta_{\text{nch}} U_{\text{chiq.max}}}{100\%}, \quad \Delta\alpha_{\text{nch}} = \frac{\Delta U_{\text{nch}}}{S_{\alpha}}, \quad (9)$$

Ikkilamchi o'lchash vositasining ajrata olish qobiliyati $\Delta U_{\min}$ bo'lganda farqlanadigan eng kichik burchak o'zgarishi hamda konstruksiyaning massa birligiga to'g'ri keladigan solishtirma sezgirlik (m – o'zgartirgich massasi):

$$\alpha_{\min} = \frac{\Delta U_{\min}}{S_{\alpha}}, \quad s_m = \frac{S_{\alpha}}{m}. \quad (10)$$

Tadqiqot obyekti sifatida ikkita tajriba konstruksiyasi – ED-1 va ED-2 qabul qilindi; ularning ko'rsatkichlari mavjud burchak siljish o'zgartirgichi bilan taqqoslandi. Taqqoslashning xolisligini ta'minlash uchun uchala o'zgartirgichda ham ta'minot kuchlanishi (12 V), chastotasi (50 Hz) hamda qo'zg'atish va o'lchash chulg'amlarining o'ramlar soni (mos ravishda 300 va 200) bir xil saqlandi. Bunday sharoitda metrologik ko'rsatkichlardagi farq faqat konstruktiv yechim bilan belgilanadi. Taqqoslash mezonlari sifatida o'lchash diapazoni, sezgirlik, o'lchash xatoligi, statik tavsifning nochiziqliligi hamda massa-gabarit ko'rsatkichlari olindi. Keyingilarining ahamiyati shundaki, qurilma konsol konstruksiyasiga sezilarli qo'shimcha mexanik yuk tushirmasligi, montaj va texnik xizmat ko'rsatishni murakkablashtirmasligi kerak.

Ishlab chiqilgan o'zgartirgichning tajriba nusxasi 1-rasmda, uning elektromagnit o'lchash elementi 2-rasmda keltirilgan.



1-rasm. Elektromagnit burchak siljish o'zgartirgichining tajriba nusxasi (ED-2)

Fig. 1. Experimental prototype of the electromagnetic angular displacement transducer (ED-2)

Tajriba konstruksiyasida magnit tizim, qo'zg'atish va o'lchash chulg'amlari hamda burchak siljishini o'zaro induktiv bog'lanishning o'zgarishiga aylantiruvchi harakatlanuvchi qism yagona o'lchash tugunida birlashtirilgan.



2-rasm. O'zgartirgichning elektromagnit o'lchash elementi

Fig. 2. Electromagnetic measuring element of the transducer

Elektromagnit o'lchash elementi burchak siljishi ta'sirida o'zaro induktiv bog'lanishning o'zgarishini shakllantiruvchi asosiy funksional qism bo'lib, uning konstruktiv parametrlari sezgirlikni, statik tavsifning chiziqliligini va o'lchash xatoligini bevosita belgilaydi.

O'zgartirgichning amaliy qo'llanish imkoniyatini baholash maqsadida uning tajriba nusxasi "O'zbekiston temir yo'llari" AJ Toshkent filiali 4-kontakt tarmog'i tumanining (ECHK-4) "Rahimov"

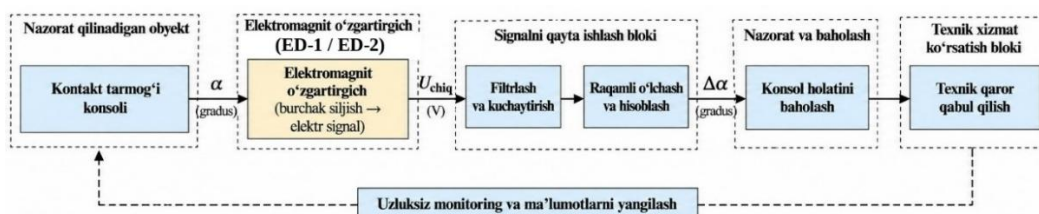
uchastkasida tayanch konsoliga o'rnatildi (3-rasm). Konsolning burchak holati o'zgarganda siljish o'zgartirgichning harakatlanuvchi elementiga uzatiladi va chiqish signali o'zgaradi. Shunday qilib, amaldagi obyektida o'lchash zanjiri "konsolning burchak siljishi → harakatlanuvchi elementning siljishi → elektromagnit o'zgartirish → chiqish signali → holatni baholash" ketma-ketligida shakllanadi.



3-rasm. O'zgartirgichning amaldagi kontakt tarmog'i uchastkasida tayanch konsoliga o'rnatilgan holati

Fig. 3. The transducer mounted on a mast cantilever in an operating section of the overhead contact line

Avtomatik monitoring tizimida o'zgartirgichning chiqish signali texnik holat to'g'risidagi diagnostik axborotning birlamchi manbai hisoblanadi. Signal filtrlash, normallashtirish va raqamli o'lchash [22] bosqichlaridan o'tgach, konsol burchagi uchun belgilangan ruxsat etilgan chegara α_{rux} bilan taqqoslanadi: $|\alpha| \leq \alpha_{\text{rux}}$ sharti normal ekspluatatsiya rejimiga, $|\alpha| > \alpha_{\text{rux}}$ sharti esa ko'rik yoki texnik xizmat ko'rsatishni talab etuvchi ogohlantirish holatiga mos keladi. Nazoratning funksional sxemasi 4-rasmda keltirilgan. Mazkur mantiq davriy ko'rikdan texnik holatga asoslangan xizmat ko'rsatishga o'tish uchun o'lchash asosini yaratadi: qaror kalendar jadvaligagina emas, balki obyektning amaldagi holati to'g'risidagi axborotga ham tayanadi.



4-rasm. Kontakt tarmog'i konsolining burchak holatini avtomatik nazorat qilishning funksional sxemasi

Fig. 4. Functional diagram of automatic monitoring of the angular position of the overhead contact line cantilever

Iqtisodiy samara nazorat qilinayotgan tugun bo'yicha, avtomatik nazorat tufayli oldi olinadigan nosozliklar xarajati bilan nazorat vositalariga sarflanadigan bir martalik xarajatlar ayirmasi sifatida, joriy etishning birinchi yili uchun baholandi:

$$E_1 = n(C_{ks} + C_{tq}) - (K_o + K_{su}), \quad (11)$$

bu yerda n – qo'lda nazorat sharoitida konsolning ruxsat etilmagan chetlanishi bilan bog'liq nosozliklarning yillik soni; C_{ks} va C_{tq} – mos ravishda kontakt simini almashtirish va tok qabul qilgichning ishdan chiqishi bilan bog'liq xarajatlar; K_o va K_{su} – o'zgartirgich va signal uzatish uskunasining qiymati. (11) ifodada avtomatik nazorat ko'rsatilgan nosozliklarning oldini to'liq oladi, degan faraz qabul qilingan; joriy ekspluatatsion xarajatlar va poyezdlar harakatidagi kechikishlardan ko'riladigan zarar hisobga olinmagan. Oldi olinadigan nosozliklarning haqiqiy ulushi p ($0 < p \leq 1$) oldindan ma'lum bo'lmagani sababli samaraning ushbu ulushga bog'liqligi hamda samara musbat bo'ladigan chegaraviy ulush $p_{\min}$ ham aniqlandi:

$$E_1(p) = pn(C_{ks} + C_{tq}) - (K_o + K_{su}), \quad p_{\min} = \frac{K_o + K_{su}}{n(C_{ks} + C_{tq})}. \quad (12)$$

Eksperimental tadqiqot metodikasi. Ishlab chiqilgan ED-1 va ED-2 elektromagnit o'zgartirgichlarning statik va metrologik tavsiflarini aniqlash maqsadida ularning tajriba namunalari tayyorlandi va eksperimental tadqiqotlar o'tkazildi. Tadqiqotlarda o'zgartirgichlarning ishlash

sharoitlarini o'zaro qiyoslash imkonini ta'minlash uchun elektr parametrlar bir xil qiymatlarda qabul qilindi: ta'minlash kuchlanishi 12 V, chastotasi 50 Hz, qo'zg'atish va o'lchash chulg'amlarining o'ramlar soni mos ravishda 300 va 200 ta. Burchak siljishining ish diapazonida o'zgartirgichlarning chiqish signali o'zgarishi tadqiq etilib, olingan statik tavsiflar asosida sezgirlik, o'lchash xatoligi va statik tavsifning nochiziqlilik darajasi baholandi. Eksperimental natijalar mavjud o'zgartirgich ko'rsatkichlari bilan qiyoslandi. Natijada mavjud o'zgartirgich, ED-1 va ED-2 ning sezgirligi mos ravishda 0,005; 0,020 va 0,020 V/gradus, o'lchash xatoligi 2,0; 1,5 va 1,0%, statik tavsifning nochiziqlilik darajasi esa mos ravishda 2,5; 2,5 va 0,1% dan ko'p emasligi aniqlandi. Tajriba namunalari konstruktiv jihatdan tayyorlanib, ulardan biri ishlab chiqarish obyektiga o'rnatilgan holda ham sinovdan o'tkazilgan.

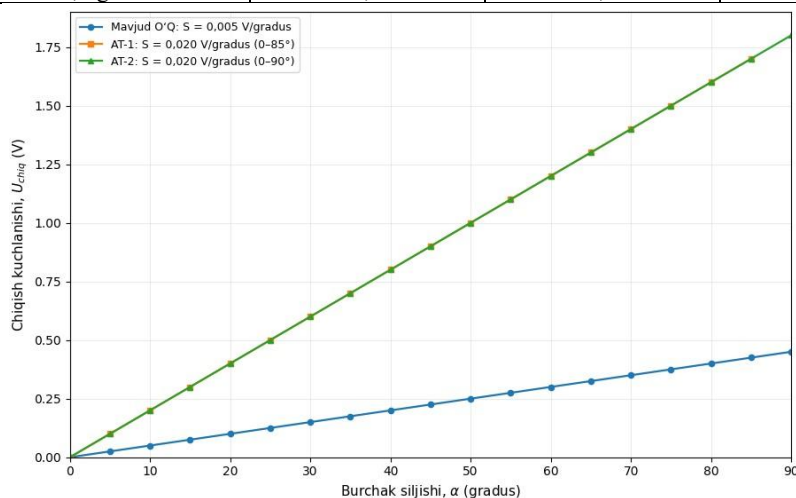
3. Natijalar va muhokama (Results and discussion)

O'zgartirgichlarning eksperimental aniqlangan asosiy texnik va metrologik ko'rsatkichlari 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval. Burchak siljish o'zgartirgichlarining asosiy texnik va metrologik ko'rsatkichlari

Table 2. Main technical and metrological indicators of the angular displacement transducers

Parametr	Mavjud	ED-1	ED-2
O'lchash diapazoni, gradus	0–90	0–85	0–90
Sezgirlik, V/gradus	0,005	0,020	0,020
O'lchash xatoligi, %	2,0	1,5	1,0
Statik tavsif nochiziqliligi, %	2,5	2,5	0,1
Ta'minlash kuchlanishi, V	12	12	12
Ta'minlash chastotasi, Hz	50	50	50
Qo'zg'atish chulg'ami o'ramlari soni	300	300	300
O'lchov chulg'ami o'ramlari soni	200	200	200
Gabarit o'lchamlari, mm	150×123×13	123×123×13	123×123×13
Massasi, kg	1,2	0,8	0,6



5-rasm. Mavjud, ED-1 va ED-2 elektromagnit o'zgartirgichlarning sezgirlik koeffitsientlari asosidagi hisobiy statik tavsiflari

Fig. 5. Calculated static characteristics of the existing, ED-1 and ED-2 electromagnetic transducers based on their sensitivity coefficients

5-rasmda mavjud, ED-1 va ED-2 o'zgartirgichlarning eksperimental aniqlangan sezgirlik koeffitsiyentlari asosida hisoblangan, statik tavsifning chiziqli approksimatsiyasi aks ettiruvchi hisobiy grafik keltirilgan; individual o'lchov nuqtalarining tabiiy sochilishi grafikda ko'rsatilmagan. Natijalarga ko'ra, mavjud o'zgartirgichning sezgirligi 0,005 V/gradusni, ED-1 va ED-2 o'zgartirgichlarida esa 0,020 V/gradusni tashkil etib, taklif etilgan konstruksiyalarda sezgirlik 4 marta oshgan. ED-2 da 0–90° o'lchash diapazoni saqlangan holda statik tavsifning nochiziqlilik darajasi 2,5% dan 0,1% gacha kamaygan.

2-jadvaldagi sezgirlik, o'lchash xatoligi va nochiziqlilik qiymatlari tajribada olingan statik tavsiflarni (3), (5) va (6) ifodalar bo'yicha qayta ishlash natijasi, gabarit o'lchamlari va massa esa bevosita o'lchash natijasidir. Quyida ushbu birlamchi ma'lumotlar asosida (4), (7) - (10) ifodalar bo'yicha hosilaviy ko'rsatkichlar hisoblangan; yuqori indeks (M), (1) va (2) mos ravishda mavjud o'zgartirgich, ED-1 va ED-2 ga tegishli. Hisob natijalari 3-jadvalda umumlashtirilgan.



Sezgirlik va chiqish signali. Taklif etilgan ikkala o'zgartirgichning sezgirliigi 0,020 V/gradus, mavjud o'zgartirgichni 0,005 V/gradus. Sezgirlikning oshish koeffitsienti:

$$K_S = \frac{S_\alpha^{(1)}}{S_\alpha^{(M)}} = \frac{S_\alpha^{(2)}}{S_\alpha^{(M)}} = \frac{0,020}{0,005} = 4.$$

(7) ifoda bo'yicha diapazonning yuqori chegarasidagi chiqish kuchlanishi:

$$U_{\text{chiq.max}}^{(M)} = 0,005 \cdot 90 = 0,45 \text{ V};$$

$$U_{\text{chiq.max}}^{(1)} = 0,020 \cdot 85 = 1,70 \text{ V};$$

$$U_{\text{chiq.max}}^{(2)} = 0,020 \cdot 90 = 1,80 \text{ V}.$$

Ta'minot kuchlanishi $U_t = 12 \text{ V}$ bo'lganda kuchlanish bo'yicha uzatish koeffitsienti:

$$k_U^{(M)} = \frac{0,45}{12} = 0,0375; \quad k_U^{(1)} = \frac{1,70}{12} = 0,142; \quad k_U^{(2)} = \frac{1,80}{12} = 0,150.$$

Demak, bir xil ta'minot sharoitida ED-2 ta'minot kuchlanishining 15,0% ini, mavjud o'zgartirgich esa atigi 3,75% ini foydali chiqish signaliga aylantiradi. Signal sathining ortishi konsol holatidagi kichik o'zgarishlarni xalaqitlar fonida ajratish imkoniyatini yaxshilaydi.

Sezgirlik o'sishining fizik asosi (4) ifodadan kelib chiqadi. Burchak chastotasi $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,1416 \cdot 50 = 314,16 \text{ rad/s}$ bo'lganda oqim ilashishining burchak bo'yicha o'zgarish tezligi:

$$\left(\frac{d\Psi_m}{d\alpha}\right)^{(M)} = \frac{S_\alpha^{(M)}}{\omega} = \frac{0,005}{314,16} = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{ Wb/gradus};$$

$$\left(\frac{d\Psi_m}{d\alpha}\right)^{(1),(2)} = \frac{0,020}{314,16} = 6,37 \cdot 10^{-5} \text{ Wb/gradus}.$$

Diapazon chegarasidagi oqim ilashishi esa $\Psi_{\text{max}} = U_{\text{chiq.max}}/\omega$ nisbatdan aniqlanadi:

$$\Psi_{\text{max}}^{(M)} = \frac{0,45}{314,16} = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}; \quad \Psi_{\text{max}}^{(2)} = \frac{1,80}{314,16} = 5,73 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}.$$

O'lchash chulg'aming o'ramlar soni ($w_2 = 200$), ta'minot kuchlanishi va chastotasi uchala o'zgartirgichda bir xil bo'lgani sababli oqim ilashishi o'zgarish tezligining 4 baravar ortishi faqat magnit tizim konstruksiyasining o'zgarishi bilan izohlanadi.

O'lchash xatoligi. Keltirilgan xatolik mavjud o'zgartirgichdagi 2,0 % dan ED-1 da 1,5 % gacha, ED-2 da 1,0 % gacha kamaygan. Xatolikning nisbiy kamayishi:

$$\delta_\gamma^{(1)} = \frac{2,0 - 1,5}{2,0} \cdot 100\% = 25\%; \quad \delta_\gamma^{(2)} = \frac{2,0 - 1,0}{2,0} \cdot 100\% = 50\%.$$

(8) ifoda bo'yicha eng katta mutlaq xatolik burchak birliklarida:

$$\Delta\alpha_{\text{max}}^{(M)} = \frac{2,0 \cdot 90}{100} = 1,80^\circ; \quad \Delta\alpha_{\text{max}}^{(1)} = \frac{1,5 \cdot 85}{100} = 1,28^\circ; \quad \Delta\alpha_{\text{max}}^{(2)} = \frac{1,0 \cdot 90}{100} = 0,90^\circ.$$

Shunday qilib, ED-2 da burchakni aniqlashning eng katta mutlaq xatoligi $1,80^\circ$ dan $0,90^\circ$ gacha, ya'ni 2 baravar kamaygan. Ushbu xatolikka chiqish kuchlanishining $\Delta U_\gamma = 0,020 \cdot 0,90 = 0,018 \text{ V} = 18,0 \text{ mV}$ og'ishi mos keladi (mavjud o'zgartirgichda $0,005 \cdot 1,80 = 9,0 \text{ mV}$).

Statik tavsifning nochiqlikligi. Eng sezilarli yaxshilanish ED-2 statik tavsifining chiziqliligida kuzatiladi: nochiqlik 2,5 % dan 0,1 % gacha, ya'ni $2,5/0,1 = 25$ baravar kamaygan, bunda $0 - 90^\circ$ to'liq o'lchash diapazoni saqlangan. (9) ifoda bo'yicha nochiqlikka mos keluvchi eng katta og'ish kuchlanish birliklarida:

$$\Delta U_{\text{nch}}^{(M)} = \frac{2,5 \cdot 0,45}{100} = 11,25 \text{ mV}; \quad \Delta U_{\text{nch}}^{(1)} = \frac{2,5 \cdot 1,70}{100} = 42,5 \text{ mV}; \quad \Delta U_{\text{nch}}^{(2)} = \frac{0,1 \cdot 1,80}{100} = 1,8 \text{ mV},$$

burchak birliklarida esa:

$$\Delta\alpha_{\text{nch}}^{(M)} = \frac{11,25}{5} = 2,25^\circ; \quad \Delta\alpha_{\text{nch}}^{(1)} = \frac{42,5}{20} = 2,13^\circ; \quad \Delta\alpha_{\text{nch}}^{(2)} = \frac{1,8}{20} = 0,09^\circ.$$

ED-1 da sezgirlik ortgani holda nochiqlik mavjud o'zgartirgich darajasida (2,5%) qolgan, o'lchash diapazoni esa $0-85^\circ$ gacha toraygan. Demak, ED-1 dan ED-2 ga o'tishda amalga oshirilgan konstruktiv o'zgarish aynan tavsifning chiziqliligini oshirishga va diapazonni tiklashga xizmat qilgan: ED-2 da chiziqli tavsifdan og'ish burchak hisobida $0,09^\circ$ dan oshmaydi.

Izoh. Nochiqlikka mos keluvchi og'ish ($\Delta\alpha_{\text{nch}}$) mavjud o'zgartirgich va ED-1 uchun umumiy eng katta xatolikdan ($\Delta\alpha_{\text{max}}$) katta ko'rinadi (mos ravishda $2,25^\circ$ va $1,80^\circ$; $2,13^\circ$ va $1,28^\circ$ — 3-jadval). Bu ziddiyat emas, balki ikki xil baholash sharoitining natijasidir: $\Delta\alpha_{\text{max}}$ (5)-ifoda bo'yicha, o'zgartirgichning individual gradirovka tavsifi (ya'ni har bir qurilma uchun alohida, ko'p nuqtali kalibrlash egri chizig'i) bo'yicha aniqlangan amaldagi o'lchash xatoligini ifodalaydi; $\Delta\alpha_{\text{nch}}$ esa (6)-ifoda bo'yicha, agar shu egri chiziq o'rniga bitta to'g'ri chiziqli approksimatsiya qo'llanilsa yuzaga keladigan qo'shimcha xatolikni ko'rsatadi. Boshqacha aytganda, amaliyotda qo'llaniladigan individual gradirovka mavjud o'zgartirgich va ED-1 ning sezilarli nochiqlikliligini (2,5%) qisman qoplaydi, shu sababli ularning amaldagi o'lchash xatoligi nochiqlik og'ishidan kichik bo'lib qoladi.

ED-2 da nochiziqlilik (0,1%) juda kichik bo'lgani uchun bu ikki yondashuv orasidagi farq amaliy ahamiyatga ega emas va butun diapazonda yagona chiziqli o'zgartirish koeffitsientini qo'llash mumkin.

Ajrata olish qobiliyati. Misol tariqasida ikkilamchi o'lchash vositasining ajrata olish qobiliyati $\Delta U_{\min} = 1 \text{ mV}$ deb olinsa, (10) ifoda bo'yicha farqlanadigan eng kichik burchak o'zgarishi:

$$\alpha_{\min}^{(M)} = \frac{1 \text{ mV}}{5 \text{ mV/gradus}} = 0,20^\circ; \quad \alpha_{\min}^{(1),(2)} = \frac{1 \text{ mV}}{20 \text{ mV/gradus}} = 0,05^\circ.$$

Massa-gabarit ko'rsatkichlari. Eng katta gabarit o'lchamning va massaning nisbiy kamayishi:

$$\delta_l = \frac{150 - 123}{150} \cdot 100\% = 18,0\%; \quad \delta_m^{(1)} = \frac{1,2 - 0,8}{1,2} \cdot 100\% = 33,3\%; \quad \delta_m^{(2)} = \frac{1,2 - 0,6}{1,2} \cdot 100\% = 50,0\%.$$

Gabarit hajm $150 \cdot 123 \cdot 13 = 239\,850 \text{ mm}^3 \approx 239,9 \text{ cm}^3$ dan $123 \cdot 123 \cdot 13 = 196\,677 \text{ mm}^3 \approx 196,7 \text{ cm}^3$ gacha kamaygan. Konsolga tushadigan qo'shimcha og'irlik kuchi $G = mg$ mavjud o'zgartirgichda $1,2 \cdot 9,81 = 11,77 \text{ N}$, ED-1 da $0,8 \cdot 9,81 = 7,85 \text{ N}$, ED-2 da $0,6 \cdot 9,81 = 5,89 \text{ N}$ ni tashkil etadi. (10) ifoda bo'yicha solishtirma sezgirlik:

$$s_m^{(M)} = \frac{5}{1,2} = 4,17; \quad s_m^{(1)} = \frac{20}{0,8} = 25,0; \quad s_m^{(2)} = \frac{20}{0,6} = 33,3 \text{ mV/(gradus} \cdot \text{kg)},$$

ya'ni ED-2 da massa birligiga to'g'ri keladigan sezgirlik mavjud o'zgartirgichnikidan $33,3/4,17 = 8$ baravar yuqori.

3-jadval. 2-jadval ma'lumotlari asosida hisoblangan hosilaviy ko'rsatkichlar

Table 3. Derived indicators calculated from the Table 2 data

Ko'rsatkich	Ifoda	Mavjud	ED-1	ED-2
Diapazon chegarasidagi chiqish kuchlanishi $U_{\text{chiq,max}}, \text{ V}$	(7)	0,45	1,70	1,80
Kuchlanish bo'yicha uzatish koeffitsienti k_U	(7)	0,0375	0,142	0,150
Oqim ilashishining o'zgarish tezligi $d\Psi_m/d\alpha$, $\mu\text{Wb/gradus}$	(4)	15,9	63,7	63,7
Diapazon chegarasidagi oqim ilashishi Ψ_{max} , mWb	$U_{\text{chiq,max}}/\omega$	1,43	5,41	5,73
Eng katta mutlaq xatolik $\Delta\alpha_{\text{max}}$, gradus	(8)	1,80	1,28	0,90
Xatolikka mos kuchlanish og'ishi ΔU_7 , mV	(8)	9,0	25,5	18,0
Nochiziqlilik og'ishi ΔU_{neh} , mV	(9)	11,25	42,5	1,8
Nochiziqlilik og'ishi $\Delta\alpha_{\text{neh}}$, gradus	(9)	2,25	2,13	0,09
Farqlanadigan eng kichik burchak $\alpha_{\min} (\Delta U_{\min} = 1 \text{ mV})$, gradus	(10)	0,20	0,05	0,05
Solishtirma sezgirlik s_m , $\text{mV/(gradus} \cdot \text{kg)}$	(10)	4,17	25,0	33,3
Gabarit hajm, cm^3	$l \cdot b \cdot h$	239,9	196,7	196,7
Konsolga qo'shimcha og'irlik kuchi G , N	mg	11,77	7,85	5,89

Shunday qilib, ED-2 ning ustunligi bitta ko'rsatkich bilan emas, balki o'zaro bog'liq ko'rsatkichlar majmuining bir vaqtda yaxshilanishi bilan tavsiflanadi: yuqori sezgirlik kichik siljishlarda signal orttirmasini kattalashtiradi, kichik xatolik burchakni aniqroq baholashni ta'minlaydi, yuqori chiziqlilik esa butun diapazonda yagona o'zgartirish koeffitsientidan foydalanish imkonini beradi. Mazkur ko'rsatkichlarni avtomatik nazorat kanalining axborot sifati nuqtai nazaridan birgalikda baholash maqsadga muvofiq.

Olingan natijalarni kontakt tarmog'i monitoringining ma'lum yondashuvlari bilan qiyoslash ularning o'zaro to'ldiruvchi xususiyatga ega ekanini ko'rsatadi. Optik ko'rik va tasvirlarni qayta ishlashga asoslangan tizimlar [1, 6] kontakt tarmog'ining ko'plab elementlarini qamrab oladi, biroq ob-havo va yoritilganlik sharoitlariga sezgir bo'lib, axborotni faqat diagnostika vositasi o'tgan paytda beradi. Tok qabul qilgich tomonidan olib boriladigan monitoring [4, 5] o'zaro ta'sir sifatini baholaydi, lekin nosozlik sababini muayyan tayanch tuguniga bog'lash qo'shimcha tahlilni talab qiladi. Taklif etilgan statsionar o'zgartirgich esa muayyan konsolning burchak holati to'g'risida uzluksiz va bevosita axborot beradi hamda shu tariqa harakatlanuvchi diagnostika vositalarini to'ldiradi.

Natijalarni tortish elektr ta'minoti tizimining ishonchliligi bilan bog'lashda sabab-oqibat zanjirini to'g'ri talqin qilish zarur. O'zgartirgichning o'zi nosozlikni bartaraf etmaydi va uning metrologik tavsiflari yaxshilangani tizim ishonchliligining muayyan miqdorga oshganini anglatmaydi. Texnik samara shundan iboratki, yuqori sifatli birlamchi o'lchash axboroti konsolning ruxsat etilmagan chetlanishini ertaroq va ishonchliroq aniqlash uchun sharoit yaratadi; bu axborot tezkor texnik xizmat ko'rsatish jarayoniga integratsiya qilinganda chetlanishning kontakt simi – tok qabul qilgich o'zaro ta'sirini buzuvchi darajagacha rivojlanish ehtimoli kamayadi. Shu ma'noda taklif etilgan yechim ishonchlilikni boshqarishning diagnostik bo'g'inini takomillashtiradi.

Avtomatik nazoratning yana bir jihati – texnik xizmat ko'rsatish resurslarini maqsadli yo'naltirish imkoniyatidir. Uzluksiz yoki belgilangan davriylikdagi o'lchashlar asosida $\alpha(t)$ trendini shakllantirish va chetlanishning o'zgarish tezligi da/dt ni baholash mumkin; bu barqaror holatni, sekin siljishni va jadallashayotgan chetlanishni farqlashga hamda ogohlantirish chegaralarini asoslashga imkon beradi. Mazkur masala uzoq muddatli kuzatuv ma'lumotlarini talab qiladi va ishning keyingi bosqichi sifatida qaraladi.

Iqtisodiy samara. Hisob "Rahimov" uchastkasi bo'yicha qabul qilingan ekspluatatsion ma'lumotlar asosida bajarildi: kontakt simini almashtirish xarajati $C_{ks} = 27\,120\,000$ so'm, tok qabul qilgichning ishdan chiqishi bilan bog'liq xarajat $C_{tq} = 9\,430\,000$ so'm, qo'lda nazorat sharoitidagi nosozliklarning yillik soni $n = 3$, signal uzatish uskunasining qiymati $K_{su} = 1\,760\,000$ so'm, o'zgartirgichning qiymati $K_o = 342\,000$ so'm. Bitta nosozlikning xarajati va nosozliklarning yillik xarajati:

$$C_{nos} = C_{ks} + C_{tq} = 27\,120\,000 + 9\,430\,000 = 36\,550\,000 \text{ so'm};$$

$$C_{yil} = nC_{nos} = 3 \cdot 36\,550\,000 = 109\,650\,000 \text{ so'm}.$$

Nazorat vositalariga bir martalik xarajatlar:

$$K = K_o + K_{su} = 342\,000 + 1\,760\,000 = 2\,102\,000 \text{ so'm}.$$

U holda (11) ifoda bo'yicha joriy etishning birinchi yili uchun hisobiy iqtisodiy samara:

$$E_1 = 109\,650\,000 - 2\,102\,000 = 107\,548\,000 \text{ so'm}.$$

(12) ifoda bo'yicha samara musbat bo'ladigan chegaraviy ulush:

$$p_{min} = \frac{2\,102\,000}{109\,650\,000} = 0,019,$$

ya'ni nazorat vositalarining qiymati nosozliklarning yillik xarajatining atigi 1,9% ini tashkil etadi, bitta nosozlikning oldi olinishining o'zi (36 550 000 so'm) esa bu xarajatni $36\,550\,000 / 2\,102\,000 = 17,4$ baravar qoplaydi. Oldi olingan nosozliklar ulushiga bog'liq holda samaraning o'zgarishi 4-jadvalda keltirilgan; u nosozliklarning oldi to'liq olinishi haqidagi farazning natijaga ta'sirini ko'rsatadi.

4-jadval. Hisobiy iqtisodiy samaraning oldi olingan nosozliklar ulushiga bog'liqligi

Table 4. Dependence of the calculated economic effect on the share of prevented failures

Oldi olingan nosozliklar ulushi p	Oldi olingan nosozliklar soni	Tejalgan xarajat $p n C_{nos}$ so'm	Samara $E_1(p)$, so'm
0,019 (p_{min})	–	2 102 000	0
1/3	1	36 550 000	34 448 000
2/3	2	73 100 000	70 998 000
1	3	109 650 000	107 548 000

Ushbu qiymat universal ko'rsatkich emas, balki qabul qilingan boshlang'ich ma'lumotlar va farazlar sharoitidagi hisobiy samarani ifodalaydi. Boshqa uchastkalarda nosozliklar chastotasi, ta'mirlash qiymati, harakat intensivligi va monitoring tizimining tarkibi (nazorat qilinadigan konsollar soni) o'zgarganda natija qayta hisoblanishi lozim.

Tadqiqotning cheklovlari. Birinchidan, harorat o'zgarishi, tebranish va namlik ta'siridagi uzoq muddatli metrologik barqarorlik ushbu ishda baholanmagan. Ikkinchidan, o'zgartirgichning qo'zg'atish chastotasi (50 Hz) o'zgaruvchan tok kontakt tarmog'ining sanoat chastotasi bilan mos keladi; shu sababli tortish tokining magnit maydoni induksiyalaydigan xalaqit foydali signal bilan bir chastotada bo'ladi va uni chastotaviy filtrlash orqali ajratib bo'lmaydi. Ekranlashning samaradorligini yoki boshqa qo'zg'atish chastotasiga o'tishning maqsadga muvofiqligini kuchlanish ostidagi liniyada eksperimental baholash zarur. Uchinchidan, o'zgartirgichning amaldagi uchastkaga o'rnatilgani uning ekspluatatsiya sharoitida qo'llanish imkoniyatini ko'rsatadi, biroq tizim ishonchililigiga miqdoriy ta'sirni isbotlamaydi: buning uchun avtomatik nazorat joriy etilishidan oldingi va keyingi davrlar bo'yicha nosozliklar chastotasi, aniqlangan chetlanishlar soni, texnik xizmatga javob berish vaqti va uzilishlar davomiyligini statistik taqqoslash talab etiladi.

4. Xulosa (Conclusion)

1. Kontakt tarmog'i konsollarining burchak siljishini avtomatik nazorat qilish uchun ED-1 va ED-2 elektromagnit o'zgartirgichlari ishlab chiqildi; ularni avtomatik monitoring tizimining birlamchi o'lchash elementi sifatida qo'llash mumkinligi amaldagi kontakt tarmog'i uchastkasida ko'rsatildi.

2. Ta'minot parametrlari (12 V, 50 Hz) va chulg'amlarning o'ramlar soni bir xil bo'lgan sharoitda ikkala o'zgartirgichning sezgirliigi 0,005 dan 0,020 V/gradusgacha, ya'ni 4 baravar oshdi; o'lchash xatoligi 2,0% dan ED-1 da 1,5% gacha, ED-2 da 1,0% gacha kamaydi.

3. ED-2 metrologik va massa-gabarit ko'rsatkichlarining eng maqbul majmuini ta'minlaydi: 0–90° o'lchash diapazoni saqlangan holda statik tavsifning nochiziqliligi 2,5% dan 0,1% gacha (burchak

hisobida 2,25° dan 0,09° gacha), eng katta mutlaq xatolik 1,80° dan 0,90° gacha, massa 1,2 kg dan 0,6 kg gacha kamaytirildi; massa birligiga to'g'ri keladigan solishtirma sezgirlik 4,17 dan 33,3 mV/(gradus·kg) gacha, ya'ni 8 baravar oshdi.

4. Qabul qilingan ekspluatatsion ma'lumotlar va farazlar asosida joriy etishning birinchi yili uchun hisobiy iqtisodiy samara 107 548 000 so'mni tashkil etdi; nazorat vositalarining qiymati (2 102 000 so'm) nosozliklarning yillik xarajatining 1,9% iga teng bo'lib, bitta nosozlikning oldi olinishi bilan oq qoplanadi. Ushbu qiymatlar muayyan uchastka sharoitiga tegishli bo'lib, boshqa obyektlar uchun qayta hisoblanishi lozim.

5. Keyingi tadqiqotlar harorat, tebranish va elektromagnit xalaqitlar ta'sirida uzoq muddatli metrologik barqarorlikni baholashga hamda avtomatik nazoratning nosozliklar chastotasiga ta'sirini "joriy etishdan oldin va keyin" ekspluatatsion statistikasi asosida miqdoriy aniqlashga qaratiladi.

ADABIYOTLAR

1. Chen S., Frøseth G.T., Derosa S., Lau A., Rönquist A. Railway Catenary Condition Monitoring: A Systematic Mapping of Recent Research. *Sensors*. 2024;24(3):1023. doi:10.3390/s24031023.
2. Wu G., Dong K., Xu Z., et al. Pantograph–catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks. *Railway Engineering Science*. 2022;30(4):437–467. doi:10.1007/s40534-022-00281-2.
3. Bruni S., Bucca G., Carnevale M., Collina A., Facchinetti A. Pantograph–catenary interaction: recent achievements and future research challenges. *International Journal of Rail Transportation*. 2018;6(2):57–82. doi:10.1080/23248378.2017.1400156.
4. Zhou N., Yang W., Liu J., Zhang W., Wang D. Investigation on Monitoring System for Pantograph and Catenary Based on Condition-Based Recognition of Pantograph. *Shock and Vibration*. 2019;2019:3839191. doi:10.1155/2019/3839191.
5. Xin T., Roberts C., Weston P., Stewart E. Condition monitoring of railway pantographs to achieve fault detection and fault diagnosis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020;234(3). doi:10.1177/0954409718800567.
6. Romadoni A., Wicaksono S., Ferryanto F. A Review on Automatic Visual Inspection for Railway Overhead Contact Line Systems. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*. 2024;8(2). doi:10.37367/jpi.v8i2.346.
7. Амиров С.Ф., Юлдашев Н.Р., Файзуллаев Ж.С., Жумабоев С.Х. Трансформаторный преобразователь угловых перемещений. Патент Республики Узбекистан № IAP 06642. Расмий ахборотнома. 2021. № 12.
8. Амиров С.Ф., Юлдашев Н.Р., Жумабоев С.Х., Файзуллаев Ж.С. Трансформаторный преобразователь угловых перемещений. Патент Республики Узбекистан № IAP 06911. Расмий ахборотнома. 2022. № 5.
9. Kumar, A.S.A.; George, B.; Mukhopadhyay, S.C. Technologies and Applications of Angle Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal* 2021, 21(6), 7195–7206. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3045461>
10. Alejandre, I.; Artés, M. Method for the evaluation of optical encoders performance under vibration. *Precision Engineering* 2007, 31(2), 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2006.03.004>
11. Bianchi G., Fanelli C., Freddi F., Giuliani F., La Placa A. Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance. *Advances in Mechanical Engineering*. 2025;17(1). doi:10.1177/16878132241285631.
12. Rodríguez-Hernández M., Crespo-Márquez A., Sánchez-Herguedas A., González-Prida V. Digitalization as an Enabler in Railway Maintenance: A Review from “The International Union of Railways Asset Management Framework” Perspective. *Infrastructures*. 2025;10(4):96. doi:10.3390/infrastructures10040096.
13. Ha D.W., Park H.S., Choi S.W., Kim Y. A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring. *Sensors*. 2013;13(12):16090–16104. doi:10.3390/s131216090.
14. Shih J.-Y., Weston P., Entezami M., Roberts C., O'Callaghan M. Experiences Using MEMS Accelerometers on Railway Bearers at Switches and Crossings to Obtain Displacement—Awkward Situations. *Infrastructures*. 2024;9(6):91. doi:10.3390/infrastructures9060091.
15. Li Y., Li R., Yang J., Xu J., Yu X. Effect of Excitation Signal on Double-Coil Inductive Displacement Transducer. *Sensors*. 2023;23(7):3780. doi:10.3390/s23073780.
16. Reinholz B.A., Seethaler R.J. Design and Validation of a Variable Reluctance Differential Solenoid Transducer. *IEEE Sensors Journal*. 2019;19(23):11063–11071. doi:10.1109/JSEN.2019.2934094.

17. Amirov S.F., Sharapov Sh.A., Sulliev A.Kh., Boltaev O.T. Biparametric resonant transformer sensor of large linear movements. AIP Conference Proceedings. 2023;2624(1):030007. doi:10.1063/5.0132847.
18. Amirov S., Boltaev O., Minazhova S., Kharshiyev K., Khakimov S. Mathematical model of an angular displacement transformer converter. AIP Conference Proceedings. 2025;3331(1):030095. doi:10.1063/5.0305983.
19. Boltaev O., Sharapov Sh., Mammadov V., Akhmedova F., Khakimov S. Investigation of the modes of transducers with an exciting screen and scattering parameters. AIP Conference Proceedings. 2025;3331(1):040052. doi:10.1063/5.0305985.
20. Juraeva K.K., Fayzullayev J.S. Mathematical models of magnetic circuits of sensors of functional diagnostic systems of electric carriers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;537(6):062026. doi:10.1088/1757-899X/537/6/062026.
21. CENELEC EN 50119:2020. Railway applications - Fixed installations - Electric traction overhead contact lines. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2020.
22. Abidova G. Calculation and development of measuring amplifier with automatable and digital comparator of ensuring switching of amplification coefficients. AIP Conference Proceedings. 2024;3152(1):050003.

REFERENCES

1. Chen S., Frøseth G.T., Derosa S., Lau A., Rönquist A. Railway Catenary Condition Monitoring: A Systematic Mapping of Recent Research. *Sensors*. 2024;24(3):1023. doi:10.3390/s24031023.
2. Wu G., Dong K., Xu Z., et al. Pantograph–catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks. *Railway Engineering Science*. 2022;30(4):437–467. doi:10.1007/s40534-022-00281-2.
3. Bruni S., Bucca G., Carnevale M., Collina A., Facchinetti A. Pantograph–catenary interaction: recent achievements and future research challenges. *International Journal of Rail Transportation*. 2018;6(2):57–82. doi:10.1080/23248378.2017.1400156.
4. Zhou N., Yang W., Liu J., Zhang W., Wang D. Investigation on Monitoring System for Pantograph and Catenary Based on Condition-Based Recognition of Pantograph. *Shock and Vibration*. 2019;2019:3839191. doi:10.1155/2019/3839191.
5. Xin T., Roberts C., Weston P., Stewart E. Condition monitoring of railway pantographs to achieve fault detection and fault diagnosis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020;234(3). doi:10.1177/0954409718800567.
6. Romadoni A., Wicaksono S., Ferryanto F. A Review on Automatic Visual Inspection for Railway Overhead Contact Line Systems. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*. 2024;8(2). doi:10.37367/jpi.v8i2.346.
7. Amirov S.F., Yuldashev N.R., Fayzullaev J.S., Jumaboev S.Kh. Transformer-type angular displacement transducer. Patent of the Republic of Uzbekistan No. IAP 06642. Official Bulletin. 2021. No. 12.
8. Amirov S.F., Yuldashev N.R., Jumaboev S.Kh., Fayzullaev J.S. Transformer-type angular displacement transducer. Patent of the Republic of Uzbekistan No. IAP 06911. Official Bulletin. 2022. No. 5.
9. Kumar A.S.A., George B., Mukhopadhyay S.C. Technologies and Applications of Angle Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2021;21(6):7195–7206. doi:10.1109/JSEN.2020.3045461.
10. Alejandre I., Artés M. Method for the evaluation of optical encoders performance under vibration. *Precision Engineering*. 2007;31(2):114–121. doi:10.1016/j.precisioneng.2006.03.004.
11. Bianchi G., Fanelli C., Freddi F., Giuliani F., La Placa A. Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance. *Advances in Mechanical Engineering*. 2025;17(1). doi:10.1177/16878132241285631.
12. Rodríguez-Hernández M., Crespo-Márquez A., Sánchez-Herguedas A., González-Prida V. Digitalization as an Enabler in Railway Maintenance: A Review from "The International Union of Railways Asset Management Framework" Perspective. *Infrastructures*. 2025;10(4):96. doi:10.3390/infrastructures10040096.
13. Ha D.W., Park H.S., Choi S.W., Kim Y. A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring. *Sensors*. 2013;13(12):16090–16104. doi:10.3390/s131216090.
14. Shih J.-Y., Weston P., Entezami M., Roberts C., O'Callaghan M. Experiences Using MEMS Accelerometers on Railway Bearers at Switches and Crossings to Obtain Displacement-Awkward Situations. *Infrastructures*. 2024;9(6):91. doi:10.3390/infrastructures9060091.
15. Li Y., Li R., Yang J., Xu J., Yu X. Effect of Excitation Signal on Double-Coil Inductive Displacement Transducer. *Sensors*. 2023;23(7):3780. doi:10.3390/s23073780.

16. Reinholz B.A., Seethaler R.J. Design and Validation of a Variable Reluctance Differential Solenoid Transducer. IEEE Sensors Journal. 2019;19(23):11063-11071. doi:10.1109/JSEN.2019.2934094.
17. Amirov S.F., Sharapov Sh.A., Sulliev A.Kh., Boltaev O.T. Biparametric resonant transformer sensor of large linear movements. AIP Conference Proceedings. 2023;2624(1):030007. doi:10.1063/5.0132847.
18. Amirov S., Boltaev O., Minazhova S., Kharshiyev K., Khakimov S. Mathematical model of an angular displacement transformer converter. AIP Conference Proceedings. 2025;3331(1):030095. doi:10.1063/5.0305983.
19. Boltaev O., Sharapov Sh., Mammadov V., Akhmedova F., Khakimov S. Investigation of the modes of transducers with an exciting screen and scattering parameters. AIP Conference Proceedings. 2025;3331(1):040052. doi:10.1063/5.0305985.
20. Juraeva K.K., Fayzullayev J.S. Mathematical models of magnetic circuits of sensors of functional diagnostic systems of electric carriers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;537(6):062026. doi:10.1088/1757-899X/537/6/062026.
21. CENELEC EN 50119:2020. Railway applications - Fixed installations - Electric traction overhead contact lines. European Committee for Electrotechnical Standardization; 2020.
22. Abidova G. Calculation and development of measuring amplifier with automatable and digital comparator of ensuring switching of amplification coefficients. AIP Conference Proceedings. 2024;3152(1):050003.