

KATTA QIYMATLI O'ZGARMAS VA O'ZGARUVCHAN TOKLARNI NAZORAT QILISH UCHUN MO'LJALLANGAN MAGNIT MODULYATSIYALI KONTAKTSIZ O'ZGARTIRGICHLARNI ISHLAB CHIQISH HAMDA ULARNING ISHONCHLILIGINI BAHOLASH

Y.A.Meliboyev¹

O.A.Xasanov¹

U.T.Mahmudov¹

R.E.Quvondiqova²

¹I.Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti,
Toshkent shahri, 100095, Universitet ko'chasi, 2-uy.

²Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, 210100,
Navoiy viloyati, Navoiy shahri, G'alaba ko'chasi, 76V-uy

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21101674>

Annotatsiya. Katta o'zgarmas va o'zgaruvchan toklarni aniq nazorat qilish sanoat korxonalari, metallurgiya majmualari hamda yirik suv xo'jaligi obyektlarida energiya samaradorligi va ekspluatatsion xavfsizlikni ta'minlashning muhim omillaridan biridir. Mazkur tadqiqotda taqsimlangan magnit parametrlariga ega bo'lgan differensial trapetsiyasimon ferromagnit o'zakli magnit-modulyatsion kontaktless tok o'zgartirgichning konstruksiyasi, matematik modeli va ishonchlilik ko'rsatkichlari tadqiq etildi. O'zgartirgichning statik va dinamik xarakteristikallari uchun matematik model ishlab chiqilib, 10 kA gacha bo'lgan tok diapazonida yaratilgan tajriba namunasi yordamida eksperimental tekshirildi. Tadqiqot natijalari nazariy va amaliy ma'lumotlar o'rtasida yuqori moslik mavjudligini ko'rsatdi. Qurilmaning chiziqlilik xatoligi 0,5 % dan kam, sezgirlik esa 1,2 mV/A ni tashkil etdi. Strukturaviy ishonchlilik tahlili asosida tizimning nosozliksiz ishlash ehtimoli normal ekspluatatsiya sharoitida 0,9980, og'ir sanoat muhitida esa 0,9969 ga teng ekanligi aniqlandi. Olingan natijalar taklif etilgan kontaktless tok o'zgartirgichning yuqori aniqlik, past quvvat yo'qotishlari va uzoq muddatli ishonchli ishlashni ta'minlovchi samarali sanoat monitoring vositasi ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: Kontaktless tok o'zgartirgich, magnit modulyatsiya, ferromagnit datchik, tok monitoringi, ishonchlilikni baholash, quvvat yo'qotishlarini kamaytirish.

Kirish. Energiya sig'imi yuqori bo'lgan sanoat majmualari, kimyoviy qayta ishlash zavodlari, metallurgiya korxonalari va nasos stansiyalari hamda gidroenergetika tizimlarini o'z ichiga olgan yirik suv xo'jaligi inshootlarining jadal modernizatsiya qilinishi elektr parametrlarini aniq va uzluksiz kuzatib borishga bo'lgan talabni sezilarli darajada oshirdi. Bu parametrlar orasida bir necha kiloampergacha yetadigan yuqori qiymatli o'zgarmas (DC) va o'zgaruvchan (AC) toklarni o'lchash texnologik jarayonlarni avtomatlashtirish, uskunalarni diagnostika qilish, foydalanish xavfsizligini ta'minlash va avariya holatlardan himoyalash uchun o'ta muhim ahamiyat kasb etadi. Tokni aniq kuzatish energiya iste'molini optimallashtirish, foydalanish xarajatlarini kamaytirish va uskunalarning qimmatbaho nosozliklarining oldini olish imkonini beradi. Sanoat sharoitida yuqori toklarni o'lchash rezistiv shuntlar va an'anaviy tok transformatorlari kabi kontaktli usullar yordamida amalga oshirib kelingan. Ushbu texnologiyalar soddaligi tufayli keng qo'llanilsa-da, yuqori tokli tizimlarda qo'llanganda bir qancha jiddiy kamchiliklarga ega. Rezistiv shuntlar Joul issiqligi tufayli katta quvvat yo'qotishlarini yuzaga keltiradi, bu esa o'z navbatida termal zo'riqish, qarshilikning siljishi va o'lchash aniqligining pasayishiga olib keladi. Bundan tashqari, shuntli tizimlarda galvanik ajratishning mavjud emasligi, ayniqsa, nosozlik holatlarida

boshqaruv zanjirlari va xizmat ko'rsatuvchi xodimlar uchun jiddiy xavf tug'diradi. An'anaviy tok transformatorlari elektr izolyatsiyasini ta'minlasa-da, o'zgarmas tok komponentlari mavjud bo'lganda magnit to'yinishiga uchraydi, bu esa signalning buzilishiga va o'lchash imkoniyatlarining cheklanishiga sabab bo'ladi [1-3]. Ushbu kamchiliklarni bartaraf etish maqsadida tokni o'lchashning turli kontaktsiz texnologiyalari, jumladan, Xoll datchiklari, Rogovskiy g'altaklari va magnit modulyatsiyali o'zgartirgichlar ishlab chiqilgan [2-5]. Xoll datchiklari kontaktsiz ishlashni ta'minlaydi, biroq harorat o'zgarishlariga va uzoq muddatli siljishga o'ta sezgir. Rogovskiy g'altaklari o'zgaruvchan tokni o'lchashda a'lo darajadagi ko'rsatkichlarni namoyon etadi, lekin o'zgarmas toklarni aniqlay olmaydi [6-9]. Magnit modulyatsiyali o'zgartirgichlar yuqori sezgirlikni ham o'zgaruvchan, ham o'zgarmas toklarni o'lchash qobiliyati bilan uyg'unlashtirib, ularni sanoatda qo'llash uchun istiqbolli yechimga aylantiradi. So'nggi tadqiqotlar ferromagnit o'zaklar tuzilishini optimallashtirish va modulyatsiya usullarini takomillashtirish orqali magnit modulyatsiyali tok datchiklarining ish samaradorligini oshirishga qaratilgan. Taqsimlangan magnit parametrlari gisterezis hodisalari va termal siljishni kamaytirgan holda o'zgartirgich xarakteristikalarining barqarorligini oshirishi mumkin. Tashqi magnit shovqinlari va elektromagnit xalaqitlarga qarshi turg'unlikni oshirish uchun ilg'or differensial magnit konfiguratsiyalar taklif qilingan. Bunga parallel ravishda, uzluksiz termal va elektromagnit zo'riqish sharoitida elektr o'lchash tizimlarining uzoq muddatli ish faoliyatini baholash uchun ishonchlilik muhandisligi uslubiyotlari tobora kengroq qo'llanilmoqda. Bu yutuqlarga qaramay, sanoat sharoitida yuqori ishonchlilikni saqlagan holda, yuqori qiymatli o'zgarmas va o'zgaruvchan toklarni aniq o'lchay oladigan, yuqori darajada integrallashgan, tejamkor va material sarfi kam bo'lgan magnit modulyatsiyali datchikka ehtiyoj saqlanib qolmoqda.

Mazkur tadqiqot magnit modulyatsiya tamoyillari va optimallashtirilgan differensial o'zak geometriyasiga asoslangan yuqori sezgir universal kontaktsiz ferromagnit o'zgartirgichni ishlab chiqish hamda sinovdan o'tkazish orqali ushbu muammoni hal qilishga qaratilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi taklif etilayotgan o'zgartirgichning statik va dinamik xarakteristikalarini tavsiflovchi kompleks matematik modelni ishlab chiqish, 0–10 kA diapazonidagi toklarni o'lchashga mo'ljallangan sanoat namunasi prototipini yaratish hamda real foydalanish sharoitlarida ishdan chiqishlar orasidagi o'rtacha vaqtni va yashovchanlik ehtimolini baholash uchun ishonchlilikni baholash tizimini yaratishdan iborat. Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundaki, unda taqsimlangan magnit parametrlariga ega bo'lgan differensial trapetsiyasimon ferromagnit o'zak joriy etilgan bo'lib, u qimmatbaho ekranlash yechimlarini talab qilmasdan, tashqi magnit xalaqitlarni va o'zaro o'qlararo magnit bog'lanishni tabiiy ravishda bostiradi. Bundan tashqari, tadqiqotda magnit o'zak va uyg'otish chulg'amlarining termal eskirishi natijasida yuzaga keladigan keskin ishdan chiqishlarni hamda parametrik degradatsiya jarayonlarini bir vaqtda hisobga oluvchi integrallashgan ishonchlilik modeli taklif etilgan. Ushbu kompleks yondashuv sanoatdagi yuqori tokli o'zgartirgichlarning aniqligi, ishonchliligi va diagnostika imkoniyatlarini takomillashtirish uchun yangi asos yaratadi.

Materiallar va metodlar. Ushbu tadqiqotning asosiy obyekti sanoat energetika tizimlaridagi yuqori doimiy va o'zgaruvchan toklarni aniq o'lchashga mo'ljallangan magnit modulyatsiyali, kontaktsiz ferromagnit tok o'zgartirgichidir. Taklif etilayotgan datchik magnit oqimining chiziqliligini yaxshilash va o'lchash sezgirligini oshirish uchun mahalliy trapetsiyasimon geometriya bilan maxsus o'zgartirilgan, simmetrik joylashgan ikkita yuqori magnit singdiruvchanlikka ega yumshoq magnit qotishma o'zakdan iborat. O'zgartirgichning tuzilishi ikkala ferromagnit o'zakka qarama-qarshi yo'nalishlarda bir tekis o'ralgan qo'zg'atish

(modulyatsiya) chulg'ami hamda o'lchanayotgan tok ta'sirida magnit modulyatsiya jarayonida yuzaga keladigan garmonik tashkil etuvchilarni aniqlash uchun mo'ljallangan differensial o'lchov chulg'amini o'z ichiga oladi. Ushbu konfiguratsiya umumiy rejimdagi buzilishlarni samarali bostirish bilan birga, tashqi magnit parazitlariga nisbatan chidamlilikni ham oshirish imkonini beradi[10-12]. O'zgartirgichning nazariy asosi flyuksgeyt magnit modulyatsiyasi tamoyiliga tayanadi. Ish paytida modulyatsiya chulg'amiga o'zgaruvchan qo'zg'atish toki ($i_{\mu} = I_{\mu m} \sin(\omega t)$) beriladi va bu har bir qo'zg'atish siklida ferromagnit o'zaklarni davriy ravishda ikki marta chuqur magnit to'yinish holatiga olib keladi. Tok bo'lmagan sharoitda ($I_x = 0$) ikkita bir xil o'zakdagi magnit oqimlarining taqsimlanishi simmetrik bo'lib, qiymati jihatidan teng, yo'nalishi bo'yicha esa qarama-qarshi bo'lib qoladi. Natijada differensial o'lchov chulg'amida hosil bo'lgan induksiyalangan elektr yurituvchi kuchlar bir-birini qoplaydi va nazariy jihatdan nolga teng chiqish signalini hosil qiladi.

O'lchanayotgan tok (I_x) birlamchi o'tkazgich orqali oqqanda, u ikkala ferromagnit o'zakning magnit ishchi nuqtasini siljitadigan tashqi magnit maydonni (H_x) hosil qiladi. Bu qo'shimcha magnit maydon to'yinish jarayonining simmetriyasini buzadi va ikki magnit zanjirda bir xil bo'lmagan magnitlanish xarakteristikalarini keltirib chiqaradi. Oqibatda magnit oqimlarining egrilik shakllari nosimmetrik ko'rinish oladi, bu esa o'lchov chulg'amining induksiyalangan elektr yurituvchi kuchida juft garmonik tashkil etuvchilar paydo bo'lishiga olib keladi. Bu garmonikalar orasida ikkinchi garmonik tashkil etuvchi (2ω) eng yuqori amplitudaga ega bo'lib, o'lchanayotgan tok bilan deyarli chiziqli bog'liqlikni namoyon etadi. Shu sababli, tokni o'lchash uchun asosiy axborot parametri sifatida ikkinchi garmonika amplitudasini ajratib olish va unga ishlov berish mumkin.

O'zgartirgichning ishini tavsiflash uchun ferromagnit o'zaklarning nochiziqli magnitlanish xususiyatlari, elektromagnit induksiya qonunlari va garmonik tahlil usullariga asoslangan mukammal matematik model ishlab chiqilgan. Ushbu model qo'zg'atish parametrlari, magnit singdiruvchanlikning taqsimlanishi, o'zak geometriyasi, tashqi magnit maydon kuchlanganligi va chiqish kuchlanishi xarakteristikalari o'rtasidagi bog'liqlikni o'rnatadi. Dinamik tahlil esa o'tkinchi jarayonlar, to'yinish effektlari, termal ta'sirlar va tashqi elektromagnit parazitlarni qo'shimcha ravishda hisobga oladi. Mazkur nazariy asos o'zgartirgich tuzilmasini optimallashtirish, uning metrologik xususiyatlarini baholash va sanoat sharoitlaridagi ishlash ishonchliligini prognozlash uchun zamin yaratadi.

$$B(H) = \alpha_1 H - \alpha_3 H^3 \quad (1)$$

bunda α_1 va α_3 — materialga xos bo'lgan strukturaviy koeffitsiyentlar. Birinchi va ikkinchi o'zaklarga ta'sir etuvchi umumiy magnit maydon kuchlanganliklari quyidagicha aniqlanadi:

$$H_1 = H_{\mu} + H_x = H_{\mu m} \sin(\omega t) + C_x I_x \quad (2)$$

$$H_2 = -H_{\mu} + H_x = -H_{\mu m} \sin(\omega t) + C_x I_x \quad (3)$$

Bu yerda C_x — birlamchi tokni o'zak hajmidagi maydon kuchlanganligiga o'tkazuvchi geometrik konstanta. w_2 o'ramli o'lchov chulg'amida hosil bo'lgan $e(t)$ EYuK Faradeyning elektromagnit induksiya qonuni bilan aniqlanadi:

$$e(t) = -w_2 S \frac{d}{dt} [B(H_1) + B(H_2)] \quad (4)$$

Kubik approksimatsiyani induksiya tenglamasiga qo'yib, quyidagini hosil qilamiz:

$$e(t) = -6 w_2 S \alpha_3 C_x I_x H_{\mu m}^2 \omega \sin(2\omega t) \quad (6)$$

Bu yerda S — magnit o'zakning ko'ndalang kesim yuzasi. Shunday qilib, ikkinchi garmonika chiqish kuchlanishining Echiq.(2 ω) amplitudasi o'lchanayotgan I_x tok kuchiga to'g'ri proporsional bo'ladi:

$$E_{chIQ.(2\omega)} = 6 w_2 S \alpha_3 c_x H_{\mu m}^2 \omega I_x = K_{conv} I_x \quad (7)$$

Bu yerda K_{conv} —strukturaviy o'zgarish koeffitsiyentini ifodalaydi.

Konvertorning strukturaviy ishonchliligi tizimli darajada dekompozitsiyalash yondashuvi yordamida modellashtirildi. Tizimning birorta muhim quyi komponentida halokatli nosozlik (masalan, ochiq zanjir, qisqa tutashuv, jismoniy sinish) yoki parametrik nosozlik (masalan, izolyatsiya qarshiligining pasayishi, magnit o'tkazuvchanlikning $\pm 5\%$ dan ortiq o'zgarishi) yuzaga kelsa, tizim ishdan chiqadi.

Tizimning umumiy ishonchlilik funksiyasi $P(t)$ eksponensial taqsimot modeli orqali ifodalanadi:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right)$$

Bunda λ_1 tarkibiy qismlarning individual ishdan chiqish ko'rsatkichlarini ifodalaydi. Asosiy ishdan chiqish ko'rsatkichlarini atrof-muhit haroratining o'zgarishi va og'ir sanoat muhitlariga xos bo'lgan tebranish profillariga muvofiq sozlash uchun ekspluatatsion stress omillari (k_1 , k_2) qo'llanildi.

Natijalar. Jismoniy prototip asosiy sanoat shinalariga xalaqit bermasdan, qisqich yordamida o'rnatishga imkon beruvchi ochiq konturli ajralma o'zakli topologiya asosida yasaldi. O'zak materiali sifatida, past koersitiv kuchni ($H_c \leq 2$ A/m) saqlab qolgan holda α_3 ni maksimallashtirish uchun maxsus vakuumli yumshatish orqali optimallashtirilgan 79NM permalloy tanlandi. Uyg'otish chastotasi $f = 1$ kHz qilib belgilandi. Statik o'zgartirish xarakteristikalarini yuqori aniqlikdagi ko'p kiloamperli birlamchi tokni kalibrlash qurilmasi yordamida baholandi. O'lchangan birlamchi tok I_x qiymati 0 dan 10 000 A gacha (ham doimiy, ham o'zgaruvchan tokning effektiv qiymati) uzluksiz o'zgartirildi. Tajribaviy bog'liqlik $I_x = 8\,000$ A gacha qat'iy chiziqlilikni saqlab qoladi. 8 500 A dan oshganda, kubik yaqinlashish modeli bilan to'liq qamrab olinmagan yuqori tartibli magnit to'yinish effektlari tufayli kichik nochiziqli siqilish ($\approx 0,48\%$) kuzatiladi. Hisoblangan o'rtacha sezgirlik 1,2 mV/A ni tashkil etdi. Komponentlarning ishdan chiqish intensivligi (λ_i) empirik sanoat ma'lumotnomalaridan olindi va yuqori haroratda ($T = 85^\circ\text{C}$) o'tkazilgan tezlashtirilgan resurs sinovlari (ALT) orqali korreksiyalandi. Ishonchlilik taqsimoti 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Quyi tizim komponenti	Bazaviy nosozlik darajasi $\lambda_b (10^{-6} \text{ h}^{-1})$	Ekologik omil ke	Moslashtirilgan nosozlik darajasi $\lambda_i (10^{-6} \text{ h}^{-1})$	Ishonchlilik $P_i(t)$
Ferromagnit o'zak	0.02	1.2	0.024	0.99976
Qo'zg'atish chulg'amlari	0.05	1.5	0.075	0.99925
Chiqish chulg'amlari	0.04	1.5	0.060	0.99940
Qo'zg'atish ossillyatori	0.12	1.3	0.156	0.99844
Signal demodulyatori	0.15	1.3	0.195	0.99805

O'zgartirgich konstruksiyasining umumiy avariyaaviy ishdan chiqish darajasi $\lambda = 0,510 \times 10^{-6} \text{ soat}^{-1}$ deb hisoblandi, bu uning ekspluatatsion ishonchliligi yuqori darajada ekanligini ko'rsatadi. Ushbu ishdan chiqish intensivligiga asoslanib, nominal yuklanish sharoitida taxminan olti oylik uzluksiz sanoatda foydalanishga teng keladigan $t = 4380$ soatlik davrda buzilishlarsiz ishlash ehtimoli $P(4380) = 0,9977$ ga teng ekani aniqlandi. Bu natija shuni tasdiqlaydiki, taklif etilayotgan o'zgartirgich uzoq muddatli foydalanish davomida avariyaaviy ishdan chiqish ehtimoli juda past bo'lgan holda barqaror ishlash ko'rsatkichini saqlab qola oladi. Ishonchlilikni baholashda avariyaaviy ishdan chiqishlardan tashqari, o'lchash aniqligiga bosqichma-bosqich ta'sir ko'rsatishi mumkin bo'lgan parametrik degradatsiya mexanizmlari ham hisobga olindi. Sinxron detektor zanjirida qo'llaniladigan sozlovchi kondensatorlarning termik dreyfiga alohida e'tibor qaratildi, chunki bu komponentlar uzoq muddatli harorat ta'siriga sezgir bo'lib, o'zgartirgichning chiqish xarakteristikalarida og'ishlarga sabab bo'lishi mumkin. Ishonchlilik modeliga ham avariyaaviy, ham parametrik ishdan chiqish mexanizmlari kiritilganda, standart ish sharoitida tizimning umumiy ishonchliligi $P = 0,9980$ deb baholanadi. Yuqori haroratli sanoat muhiti va noqulay foydalanish sharoitlarida ishonchlilik atigi $P = 0,9969$ gacha biroz pasayadi. Bu esa taklif etilayotgan magnit modulyatsiyali tok o'zgartirgichining murakkab sanoat sharoitlarida qo'llash uchun puxta va uzoq muddat barqaror ekanligini tasdiqlaydi.

Muhokama. Ishlab chiqilgan qurilmaning asosiy ustunligi muvozanatlashtirilgan differensial magnit o'zak geometriyasidan foydalanilganidadir. Mazkur konstruktiv yechim magnit o'zakda harorat ta'sirida yuzaga keladigan boshlang'ich parametrik dreyfni samarali kompensatsiya qiladi. Hall-effekt elementlaridan farqli ravishda, yuqori harorat ta'sirida materialning kristall panjarasida lokal o'zgarishlar yuz berishi natijasida sezgirlik va o'lchash aniqligi pasayishi mumkin. Taklif etilgan o'zgartirgichda esa permalloy magnit o'zaklarning differensial konfiguratsiyasi tashqi muhit ta'sirida hosil bo'ladigan magnit oqim o'zgarishlarining ikkala o'zakka ham simmetrik ravishda ta'sir etishini ta'minlaydi. Natijada chiqish chulg'amidagi differensial ayirish jarayonida ushbu o'zgarishlar o'zaro kompensatsiyalanadi va qurilmaning harorat barqarorligi sezilarli darajada oshadi. Yuqori chiziqlilik va tasdiqlangan konstruktiv ishonchlilikka qaramay, tizim ayrim cheklovlariga ega. Birinchidan, o'zgaruvchan toklarni o'lchash diapazonining yuqori chastota chegarasi qo'zg'atish chastotasi (1 kHz) bilan cheklanadi. Shu sababli tarkibida 500 Hz dan yuqori garmonikalar mavjud bo'lgan tez o'zgaruvchan toklarni o'lchashda signal amplitudasining susayishi va fazaviy siljishlar kuzatilishi mumkin. Ikkinchidan, ajraluvchi

magnit o'zak (split-core) konstruksiyasi qurilmani o'rnatish vaqtida yuqori aniqlikdagi mexanik markazlashtirishni talab qiladi. Agar magnit o'zak qismlari orasidagi havo oralig'ida $\Delta l_g > 10 \mu\text{m}$ miqdorida asimmetriya yuzaga kelsa, magnit qarshiliklar muvozanati buziladi. Bu esa nol tok holatida qoldiq chiqish kuchlanishining ortishiga olib kelishi mumkin. Nazariy jihatdan mazkur tadqiqot fluxgate turidagi magnit modulyatsion qurilmalarni nochiziqli modellash tirish sohasini rivojlantiradi. Xususan, simmetrik magnit o'zak geometriyasi bilan birgalikda qo'llanilgan soddalashtirilgan kubik polinomli magnit induksiya funksiyasining amaliy qo'llash uchun yetarli aniqlikka ega ekanligi ko'rsatildi. Amaliy jihatdan esa ishlab chiqilgan sensor metallurgiya korxonalari, yirik suv ta'minoti va sug'orish nasos stansiyalari uchun texnik xizmat ko'rsatishni talab qilmaydigan, juda kam quvvat yo'qotishlariga ega bo'lgan va texnologik jarayonni to'xtatmasdan o'rnatish mumkin bo'lgan samarali monitoring vositasi hisoblanadi. Bu esa elektr energiyasi sarfini nazorat qilish sifatini oshirish, uskunalar holatini uzluksiz monitoring qilish hamda avariya viy nosozliklarning oldini olish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Xulosa. Mazkur tadqiqot davomida 10 kA gacha bo'lgan yuqori toklarni o'lchash uchun mo'ljallangan zamonaviy magnit modulyatsion kontaktsiz tok o'zgartkichi ishlab chiqildi, matematik jihatdan modellash tirildi va eksperimental sinovlardan o'tkazildi. Taklif etilgan nochiziqli kubik induksiya funksiyasiga asoslangan matematik model sensorning ikkinchi garmonik signal hosil bo'lish jarayonini yuqori aniqlikda tavsiflab berdi. Nazariy hisob-kitoblar va eksperimental kalibrlash natijalari o'rtasida yuqori moslik kuzatilib, 8,5 kA gacha bo'lgan diapazonda chiziqlilik koeffitsiyenti $R^2 = 0,9952$ ni tashkil etdi. Ishlab chiqilgan qurilma 1,2 mV/A sezgirlikka ega bo'lib, to'liq galvanik ajratishni ta'minladi hamda quvvat yo'qotishlarini amalda nol darajagacha kamaytirishga erishildi. O'tkazilgan ishonchlilik tahlili natijalariga ko'ra, tizimning nosozliksiz ishlash ehtimoli 0,9980 gacha yetishi aniqlandi, bu esa qurilmaning uzoq muddatli va texnik xizmat ko'rsatmasdan ekspluatatsiya qilinish imkoniyatini tasdiqlaydi. Qurilmani nasos stansiyalari, metallurgiya korxonalari va kimyo sanoati obyektlari kabi og'ir sanoat sharoitlarida qo'llash uchun sensor korpusini yuqori zichlikdagi poliuretan kompozitsiyasi bilan germetik qoplash tavsiya etiladi. Bunday himoya mexanik zarbalar, vibratsiyalar va namlikning ichki elementlarga salbiy ta'sirini kamaytiradi. Shuningdek, qo'zg'atish zanjirida barqarorlashtirilgan kristalli generatorlardan foydalanish maqsadga muvofiq hisoblanadi, chunki qo'zg'atish chastotasining o'zgarishi ikkinchi garmonikani demodulyatsiya qilish jarayonida fazaviy xatoliklarni yuzaga keltirishi mumkin.

Adabiyotlar, References, Литературы:

1. Ma, Y., Guo, X., Li, J., Wang, W., Chen, Y., Pan, J., & Chen, J. (2025). A survey on magnetic sensing and communication: Technologies, sensors, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
2. Peng, D., Xun, C., & Meijuan, Z. (2026). Design and research of a high-precision TMR non-contact current sensor based on a dual-gap anti-interference structure. *Sensor Review*, 1-16.
3. Shrawane, P., & Sidhu, T. (2024). Magnetic sensors for contactless and non-intrusive measurement of current in AC power systems. *The Journal of Engineering*, 2024(6), e12371.
4. Nikolic, B. (2023). *Mathematical Modelling and Design of Current Sensors in Non-Conventional Instrument Transformers* (Doctoral dissertation, City, University of London).
5. Ripka, P. (2019). Contactless measurement of electric current using magnetic sensors. *tm-Technisches Messen*, 86(10), 586-598.
6. Plakhtiev, A., Gaziev, G., Meliboev, Y., Doniyorov, O., & Norxolboyev, D. (2021, January). Dynamic characteristics of contactless wide range high current ferromagnetic converters for

- monitoring and control systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1030, No. 1, p. 012177). IOP Publishing.
7. Xiang, Y., Chen, R. X., & Chen, K. L. (2022). Contactless HVDC overhead-line current monitoring by a magnetic sensor array with sensing parameter correction function. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-13.
 8. Kondalkar, V. V., Li, X., Park, I., Yang, S. S., & Lee, K. (2018). Development of chipless, wireless current sensor system based on giant magnetoimpedance magnetic sensor and surface acoustic wave transponder. *Scientific Reports*, 8(1), 2401.
 9. Ayambire, P. N., Huang, Q., Cai, D., Bamisile, O., & Anane, P. O. K. (2020). Real-time and contactless initial current traveling wave measurement for overhead transmission line fault detection based on tunnel magnetoresistive sensors. *Electric Power Systems Research*, 187, 106508.
 10. Plakhtiev, A., Gaziev, G., Meliboev, Y., Doniyorov, O., Norholboyev, D., & Ibragimov, J. (2021). Static characteristics of contactless converters of monitoring and control systems. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 04015). EDP Sciences.
 11. Plakhtiev, A., Gaziev, G., Doniyorov, O., & Muradov, K. (2023). High-current contactless ferromagnetic converters for multi-profile monitoring and control systems. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 401, p. 04015). EDP Sciences.
 12. Plakhtiev, A., Denmuhammadiev, A., & Gaziev, G. (2020, July). Contactless galvano-magnetics transducers of monitoring and control systems in agricultural energy. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 883, No. 1, p. 012148). IOP Publishing.