

UO'K: 621.317.714

 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.41

**YUQORI TOKLI KONTAKTSIZ O'ZGARTKICHLARDA QO'SHNI
SHINALAR TOKLARINING NAZORAT-BOSHQARUV TIZIMLARIGA
TA'SIRI VA UNDAN KELIB CHIQADIGAN XATOLIKLARNI TAHLILI**



**Plaxtiyev Anatoliy
Mexaylovich**

Professor, "Toskent irrigatsiya va qishloq xo'saligini mexanizatsiyalashtirish muhandislari instituti" MTU, Toshkent, O'zbekiston
E-mail: a.plakxtiev@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-4500-8201



**Meliboyev Yax'yon
A'zamjon o'g'li**

Katta o'qituvchi, I.Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O'zbekiston
E-mail: meliboyevyahyoyon@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5796-1433



**Xasanov Otobek
Abdumomin o'g'li**

Katta o'qituvchi, I.Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O'zbekiston
E-mail: otabek.xasanov.93@list.ru
ORCID ID: 0009-0003-1561-446X

Annotatsiya. Maqolada yuqori kuchlanishli elektr inshootlarida qo'llaniladigan to'g'ridan-to'g'ri toklarni o'lchash va nazorat qilish uchun mo'ljallangan kontaktsiz ferromagnit o'zgartkichlarning qurilish tamoyillari, ularning ishlash prinsipi hamda ularga qo'yiladigan davlat va xalqaro standartlarga mos asosiy talablar batafsil yoritilgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, taklif etilgan konstruktiv yechim an'anaviy o'zgartkichlardan farqli ravishda boshqaruv signalining keng diapazonda o'zgarishini qabul qilishi, o'lchashning yuqori aniqligi va sezuvchanligi, texnologik soddaligi, material sarfining minimalligi, arzonligi, ixcham o'lchamlari va kichik vazni bilan ajralib turadi. Shuningdek, maqolada kontaktli bo'limgan magnitonodulyatsion o'zgartkichlarda qo'shni shinalardan oqib o'tuvchi mos yo'nalishli va qarama-qarshi yo'nalgan toklarning o'lchash jarayoniga keltiradigan xatoliklari chuqur tahlil qilingan. Olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, qo'shni shina toklarining magnit ta'siri natijasida yuzaga keladigan xatoliklar o'lchash nuqtalarining soni hamda magnit palladagi bo'linishlar soni o'zgarishi bilan sezilarli darajada farq qiladi. Jumladan, o'lchash nuqtalari soni o'n ikkidan ortganda, magnit maydonning bo'linish zichligiga bog'liq ravishda xatolik keskin kamayishi yoki aksincha ortishi mumkin. Bu esa o'zgartkichlarning konstruktiv loyihasida optimal parametrlarni tanlash zarurligini ko'rsatadi. Ishlab chiqilgan yangi avlod magnit-modulyatsion kontaktsiz o'zgartkichlari amaliyatda keng qo'llanish imkoniyatiga ega bo'lib, sanoat korxonalarini, temir yo'l avtomatikasi, metallurgiya jarayonlari, suv ta'minoti tizimlari, melioratsiya, ilmiy-texnik tadqiqotlar hamda boshqa tarmoqlarda o'zgaruvchan va o'zgarmas toklarni kontaktsiz nazorat qilishda yuqori samaradorlik ko'rsatadi. Shuningdek, elektr hisoblagichlarni joyida qiyoslash va verifikasiya qilishda, ayniqsa, katta tokli shinalarda, qo'shimcha mexanik ulanishlar talab qilinmaydigan holatlarda samarali qo'llanishi mumkin.

Kalit so'zlar: kontaktsiz o'zgartkich, xatolik, suv ta'minoti, nazorat va boshqarish tizimlari, modulyatsiya.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТОКОВ СОСЕДНИХ ШИН НА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ В БЕСКОНТАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ВОЗНИКАЮЩИХ ВСЛЕДСТВИЕ ЭТОГО ОШИБОК

Плахтиев Анатолий

Михайлович

Ташкентский институт
иригации и
сельскохозяйственной
механизации, профессор,
Ташкент, Узбекистан

Мелибоев Яхёжон

Аъзамжон угли

И. Каримов, Ташкентский
государственный технический
университет, старший
преподаватель, Ташкент,
Узбекистан.

Хасанов Отабек

Абдумумин угли

И. Каримов, Ташкентский
государственный технический
университет, старший
преподаватель, Ташкент,
Узбекистан.

Аннотация. В статье подробно изложены принципы построения бесконтактных ферромагнитных преобразователей, предназначенных для измерения и контроля постоянных токов, применяемых в высоковольтных электроустановках, принцип их работы и основные требования к ним, соответствующие государственным и международным стандартам. Согласно результатам исследования, предлагаемое конструктивное решение отличается от традиционных преобразователей способностью воспринимать изменения управляющего сигнала в широком диапазоне, высокой точностью и чувствительностью измерений, технологической простотой, минимальным расходом материалов, низкой стоимостью, компактными размерами и малым весом. Также в статье подробно проанализированы погрешности, возникающие в процессе измерения токов одинакового и противоположного направления, протекающих через соседние шины в бесконтактных магнитомодуляционных преобразователях. Проведенные исследования показали, что погрешности, возникающие в результате магнитного воздействия токов соседних шин, существенно различаются в зависимости от количества точек измерения и количества делений в магнитной полосе. Разработанные бесконтактные преобразователи нового поколения имеют широкие возможности практического применения и демонстрируют высокую эффективность в бесконтактном контроле переменных и постоянных токов на промышленных предприятиях, в железнодорожной автоматике, металлургических процессах, системах водоснабжения, мелиорации, научно-технических исследованиях и других отраслях. Они также могут эффективно использоваться при поверке и верификации электросчетчиков на месте, особенно на шинах с большим током, где не требуются дополнительные механические соединения.

Ключевые слова: бесконтактный преобразователь, погрешность, водоснабжение, системы контроля и управления, модуляция.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CURRENTS IN NEIGHBORING BUSBARS ON CONTROL SYSTEMS IN HIGH-VOLTAGE NON-CONTACT CONVERTERS AND THE RESULTING ERRORS

Plakhtiev Anatoly

Mikhailovich

Professor, Tashkent Institute of
Irrigation and Agricultural
Mechanization Engineers,
Tashkent, Uzbekistan

Meliboev Yahyojon

Azamjon ugli

Senior Lecturer, I. Karimov
Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

Khasanov Otabek

Abdumumin ugli

Senior Lecturer, I. Karimov
Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This article details the construction principles of contactless ferromagnetic converters designed for measuring and controlling direct currents used in high-voltage electrical installations, their operating principle, and the main requirements they must meet according to state and international standards. According to the research results, the proposed design solution, unlike traditional converters, is characterized by its ability to accept a wide range of changes in the control signal, high measurement accuracy and sensitivity, technological simplicity, minimal material consumption, low cost, compact dimensions, and light weight. The article also provides an in-depth analysis of the errors caused in the measurement process by currents flowing in corresponding and opposite directions through adjacent busbars in non-contact magnetomodulation converters. The conducted research showed that the errors arising from the magnetic influence of adjacent busbar currents differ significantly depending on the number of measurement points and the number of divisions in the magnetic core. In particular, when the number of measurement points exceeds twelve, the error can sharply decrease or, conversely, increase depending on the density of magnetic field divisions. This indicates the need to select optimal parameters in the design of the converters. The developed new generation of magnetic-modulation contactless converters has wide practical application potential and shows high efficiency in contactless monitoring of alternating and direct currents in industrial enterprises, railway automation, metallurgical processes, water supply systems, land reclamation, scientific and technical research, and other sectors. It can also be effectively used for on-site calibration and verification of electricity meters, especially on high-current busbars, where no additional mechanical connections are required.

Keywords: contactless converter, error, water supply, control and management systems, modulation.

Kirish. Hozirgi kunda texnologik va fizik jarayonlarni avtomatlashtirilgan boshqarish tizimlarida axborotni yig'ish, uzatish, qayta ishlash va real vaqt rejimida tahlil qilishga qo'yilayotgan talablar sezilarli darajada ortib bormoqda. Elektr energetikasi sohasida bu talablar ayniqsa dolzarbashgan bo'lib, sanoat korxonalari, gidrotexnika inshootlari, irrigatsiya tizimlari hamda melioratsiya obyektlarida qo'llaniladigan kuchli elektr jihozlarining xavfsiz va uzlusiz ishlashi to'g'ridan-to'g'ri aniq o'lchov va ishonchli nazorat bilan bog'liq.

Bunday obyektlarda ko'pincha katta o'zgarmas toklar (KO'T) bilan ishlovchi elektr yuritmalar, kuch transformatorlari, nasos agregatlari va avtomatlashtirilgan ta'minot tizimlari qo'llaniladi. Bu esa o'z navbatida kuch zanjirlaridagi toklarni uzmasdan, ya'ni o'tkazgich yaxlitligini buzmagan holda, energiya tejamkor va kontaktsiz usullarda nazorat qilishni taqozo etadi. Shu ehtiyojlar zamонавија ajraladigan integral sxemali kontaktsiz ferromagnit o'zgartirgichlarning (KFO') ishlab chiqilishi va takomillashtirlishiga olib keldi.

Kontaktsiz ferromagnit o'zgartirgichlarning asosiy afzalligi shundaki, ular katta qiymatli (o'n, yuz yoki mingdan yuqori amperli) o'zgarmas toklarni xavfsiz, masofadan turib, elektr zanjirini uzmasdan aniqlik bilan o'lchash imkonini beradi.

Bunday o'lchash tizimlarining aniqligi ko'pincha 1–3% diapazonda bo'lishi, ayrim hollarda esa ko'p chegarali va yuqori sezgirlikka ega kontaktsiz o'zgartirgichlardan foydalanish talab etiladi [1–2].

Shunga qaramay, ushbu yo'nalishda ko'plab ilmiy izlanishlar olib borilganiga [1,3,6,7,9–14] qaramay, hozirgi kunga qadar O'zbekiston va MDH davlatlarida asbobsozlik sanoati tomonidan yengil, ixcham, energiya tejamkor, buzmasdan o'lchov olib boruvchi statsionar yoki ko'chma kontaktsiz KO'T o'lchash asboblari seriyali ishlab chiqarishga joriy etilmagan. Buning bir necha asosiy sabablari mavjud: mavjud qurilmalar hali to'liq sinovdan o'tmagan; aniqlik va sezgirlikka qo'yiladigan talablar yuqori; tashqi magnit maydonlar ta'sirini kamaytirish bo'yicha konstruktiv yechimlar yetarli darajada ishlab chiqilmagan; ilmiy ishlanma va sanoat texnologiyasi o'rtaida integratsiya sust.

Bugungi kunda mavjud kontaktsiz o'zgartirgichlar va KO'T hisoblagichlarining texnik tahlili shuni ko'rsatadiki, ularning birortasi amaldagi qat'iy metrologik, konstruktiv va energiya samardorligi talablariga to'liq javob bermaydi. Shu bois katta o'zgarmas toklarni yuqori aniqlikda, kontaktsiz va barqaror rejimda nazorat qilish zamонавија avtomatlashtirish va axborot-o'lchash texnologiyalarining eng dolzarb ilmiy-amaliy masalalaridan biri hisoblanadi [2].

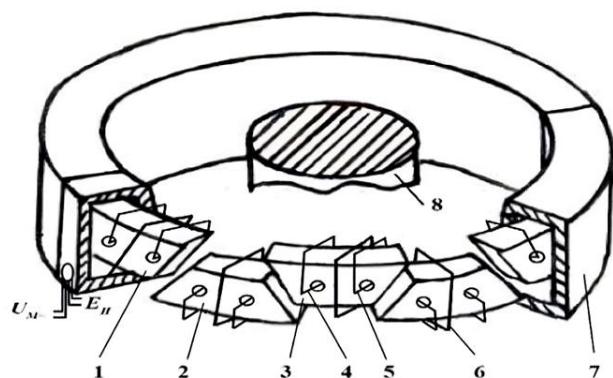
Hozirgi amaliyotda qo'llanilayotgan magnitomodulyatsion ferromagnit o'zgartirgichlar o'zining keng tarqalganligiga qaramay, bir qator jiddiy cheklov larga ega. Jumladan: boshqariladigan tok diapazoni tor; sezgirlik past; tashqi elektromagnit shovqinlarga sezuvchanlik yuqori; massasi va gabarit o'lchamlari kattaroq; signallarning chiziqliligi yetarli emas; qo'shni shinalar toki ta'sirida sezilarli o'lhash xatoliklari paydo bo'ladi.

Shu munosabat bilan yangi avlod ajraladigan integral sxemali kontaktsiz KFO'larni ishlab chiqishda asosiy vazifalardan biri — yuqoridagi kamchiliklarni bartaraf etish, o'lhash aniqligini oshirish, elektromagnit ta'sirlarni kamaytirish va qurilmaning konstruktiv imkoniyatlarini takomillashtirishdir. Ayniqsa, qo'shni shinalardan kelib chiqadigan magnit maydonlarning nazorat tizimi aniqligiga ta'sirini kamaytirish bugungi kunda muhim ilmiy-texnik muammo sifatida ko'rilmoxda.

Shu sababli, kontaktsiz ferromagnit o'zgartirgichlarda qo'shni shinalar toklarining ta'siri natijasida yuzaga keladigan xatoliklarni chuqur o'rganish, ularni nazariy va tajribaviy tahlil qilish, bartaraf etishning samarali yechimlarini taklif etish mazkur tadqiqotning asosiy ilmiy-texnik ahamiyatini belgilaydi.

Biz amaliyotda keng qo'llaniladigan va ma'lum bo'lganlardan kichik o'lchamlar va og'irlik bilan boshqariladigan diapazonning kengayishi, aniqlikning oshishi, material sarfi va narxi past bo'lgan, konstruksiyaning soddaligi va texnologikligi, integratsiya sxemasi va ko'p chegarali o'zgartirgichning moslashuvchanligi, shuningdek, o'zgarmas va o'zgaruvchan toklarni kontaktsiz nazorat qilish imkoniyati bilan farq qiladigan, energiya tejaydigan buzmasdan o'lhashning bir qator yangi konstruksiyalarini ishlab chiqdik va tadqiq qildik [2].

MATERIALLAR VA USULLAR. Nazorat va boshqaruv tizimlarining katta o'zgarmas toklari uchun ishlab chiqilgan energiya tejaydigan keng diapazonli kontaktsiz magnitomodulyatsiyalovchi ferromagnit o'zgartirgichning konstruksiyasini ko'rib chiqaylik. U 1-rasmda ko'rsatilgan bo'lib, nazorat va boshqaruv tizimlarining katta o'zgarmas toklarni kontaktsiz o'zgartirgichlarining qo'shni shinalar toklari ta'siridagi xatoligini ham tahlil qiladi.



1-rasm. Monitoring va boshqaruv tizimlarining katta o'zgarmas toklarini o'lhash uchun keng diapazonda ishlaydigan kontaktsiz magnitomodulyatsion o'zgartgich.

KO'T o'zgartirgich [8] assosida ishlab chiqilgan. U o'zgartirilgan o'zgarmas tok o'tkazuvchi shinani 2 erkin o'rab turuvchi, ajraladigan yopiq magnit zanjir 1 dan iborat bo'lib, u ikkita yarim qismidan tashkil topgan: 2 va 3. Har bir yarim qism bir xil tirqishlar bilan ajratilgan trapetsiya shaklidagi alohida ferromagnit elementlardan tuzilgan. Har bir ferromagnit elementda ikkita teshik mavjud bo'lib, ularning har biridan modulyatsiyalovchi chulg'amning 4 va 5 seksiyalari o'tkazilgan. O'tish teshiklari orasida modulyatsiyalovchi chulg'amning ustidan o'lchov chulg'ami 6 o'ralgan. Barcha o'lchov chulg'amlari ketma-ket ulanib, o'lchov qurilmasiga ulangan, modulyatsiyalovchi chulg'amlar ham ketma-ket ulanib, barqaror o'zgaruvchan tok manbaiga ulangan. Modulyatsiyalovchi chulg'amning 4 va 5 seksiyalari orasidagi ketma-ket ulash va ularda o'zgaruvchan tokning mavjudligi, hamda o'lchov chulg'amlari 4 ning ferromagnit elementlar 1 dagi teshiklar orasida joylashishi, boshqariladigan o'zgarmas tok hosil qiladigan ishchi oqim yo'lida magnit zanjirning magnit qarshiligini bo'ylama modulyatsiya qilish va o'zgartirilgan o'zgarmas tokka bog'liq ravishda o'lchov chulg'amlari 6 da EYUK ni hosil qilish imkonini berdi. Ishlab chiqilgan KFO', modulyatsiyalovchi chulg'amning 2 va 3 qismlarida o'zgaruvchan tok bo'limganda ham, o'zgaruvchan tokni boshqara oladi.

Ishlab chiqilgan KFO' konstruksiyasida boshqariladigan o'zgarmas tokning yuqori chegarasi, magnit zanjiri elementlarining po'lati bo'ylab ishchi magnit oqimining uzunligini oshirish va uning

yo‘liga bo‘ylama-ko‘ndalang havo bo‘shliqlarini kiritish orqali oshiriladi. Bu magnit parametrlari bo‘ylama va ko‘ndalang taqsimlangan ajraladigan magnit zanjirini yaratish bilan amalga oshiriladi. KFO‘ning ajraluvchan magnit zanjirining 2 va 3 yarimlarini o‘zaro siljitishtor qilish orqali trapetsiyalar orasidagi tirkishlarning o‘lchamlarini o‘zgartirish mumkin. Bu esa boshqariladigan doimiy tok hosil qilgan ishchi magnit oqimi yo‘lidagi magnit zanjirining umumiy magnit qarshiligini o‘zgartiradi. Natijada boshqariladigan tok chegarasi o‘zgaradi va bu KFO‘ ni ko‘p chegarali qilish imkonini beradi.

Natijalar va muhokama. Ajraladigan magnit zanjirli kuchlanish transformatorini (KT) nazorat qilishda, KFO‘ 8-shinani qamrab oladi. Modulyatsion amper o‘chirgichlar ta’sirida, ta’mot kuchlanishining har yarim davrida magnit zanjiri to‘yingan holatga keladi. Bu paytda, boshqarilayotgan tok hosil qilgan bo‘ylama maydon uchun magnit zanjirining o‘tkazuvchanligi keskin pasayadi. Modulyatsiya toki nol qiymatdan o‘tganda esa, magnit zanjirining o‘tkazuvchanligi dastlabki qiymatiga qadar ko‘tariladi. Natijada, o‘lchov chulg‘amidagi modulyatsiya amper o‘chirgichlarining barqarorligi tufayli, boshqarilayotgan tokka mutanosib bo‘lgan elektr yurituvchi kuch (EYK) quyidagi ko‘rinishda hosil bo‘ladi:

$$E_{o'rt} = \frac{E_b}{\pi} [2 \operatorname{arctg} H_x - \operatorname{arctg}(H_x - 1,65) - \operatorname{arctg}(H_x + 1,65)]. \quad (1)$$

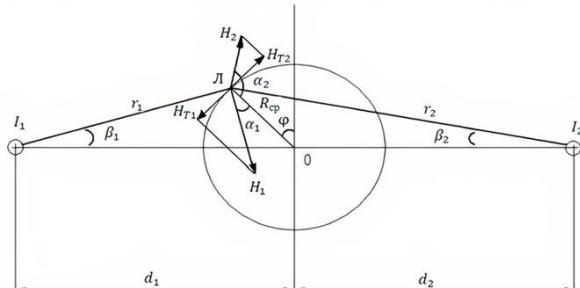
Bu yerda E_b - chiqishdagi EYKning asosiy qiymati; H_x - o‘lchanayotgan o‘zgarmas tok qiymatiga mos keluvchi magnit maydon kuchlanganligi.

Tokli qo‘sni shinalar ta’siridan kelib chiqadigan xatoliklarni o‘rganish uchun, avvalo, maydon kuchlanganligining urinma tashkil etuvchisining KFO‘ konturi bo‘ylab taqsimlanish qonunini bilish kerak. Umuman olganda, KFO‘ zanjiri I_1 va I_2 toklarga ega bo‘lgan ikkita qo‘sni shinalar orasida joylashishi mumkin (2-rasm). Bu toklarning yo‘nalishini bizga nisbatan bir xil deb qabul qilaylik.

Bunday holda, KFO‘ zanjiridagi L nuqtasida, unda o‘zak bo‘lmaga, qo‘sni shinalardan keladigan magnit maydon kuchlanganliklari quyidagicha teng bo‘ladi:

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi r_1} \quad (2)$$

$$H_2 = \frac{I_2}{2\pi r_2} \quad (3)$$



2-rasm. Qo‘sni shinalar toklaridan kelib chiqadigan kuchlanishning tangensial tashkil etuvchisining KFO‘ konturi bo‘ylab taqsimlanish qonuniyatini aniqlash.

Kuchlanishlarning urinma tashkil etuvchilari uchun quyidagicha yozish mumkin:

$$H_{T_1} = \frac{I_1}{2\pi r_1} \sin \beta_1 \quad (4)$$

$$H_{T_2} = \frac{I_2}{2\pi r_2} \sin \beta_2 \quad (5)$$

β_1 , β_2 va r_1 , r_2 larni markaziy burchak orqali ifodalab, o‘zgartirgich zanjirida magnit zanjiri bo‘lmaga, qo‘sni shinalardan quyidagi ko‘rinishdagi toklarga ega bo‘lgan o‘zgartirgich zanjiri bo‘ylab maydon kuchlanganliklarining urinma tashkil etuvchisining taqsimlanish qonunini olamiz.

$$H_{T_\Sigma} = H_{T_1} \pm H_{T_2} = \frac{I_1}{\pi D_{o'rt}} \left[\frac{K_{d_1} \sin(\varphi-1)}{1+K_{d_1}^2 - 2K_{d_1} \sin \varphi} + \frac{K_1 (K_{d_2} \sin(\varphi+1))}{1+K_{d_2}^2 + 2K_{d_2} \sin \varphi} \right] \quad (6)$$

$$\text{bu yerda: } K_{d_1} = \frac{d_1}{R_{o'rt}}, \quad K_{d_2} = \frac{d_2}{R_{o'rt}}, \quad K_I = \frac{I_2}{I_1}.$$

6) funksiyasining grafiklari $K_I = 1,0$ va $K_{d_1} = K_{d_2} = K_d = 1,5; 2,0; 2,51$ ning qiymatlarida 3-rasmida I_2 va I_1 toklarning bir xil yo‘nalishi bilan, hamda toklarning qarama-qarshi yo‘nalishi bilan ko‘rsatilgan.

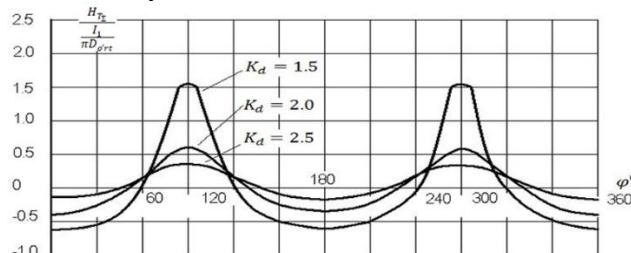
KFO‘ zanjirida magnit konturi mavjud bo‘lganda, toklarga ega qo‘sni shinalardan hosil bo‘lgan magnit maydon kuchlanganligining urinma tashkil etuvchisi quyidagiga teng bo‘ladi:

$$K_2 H_{T_{\Sigma\mu}} = H_{x_1} \left[\frac{K_{d_1} \sin(\varphi-1)}{1+K_{d_1}^2 - K_{d_1} \sin \varphi} + \frac{K_{d_2} \sin(\varphi+1)}{1+K_{d_2}^2 + 2K_{d_2} \sin \varphi} \right] \quad (7)$$

agar:

$$H_{x_1} = \frac{I_1}{\pi D_{o'rt}} \cdot K_p a_2 \quad (8)$$

bunda a_2 - yaqinlashuv koeffitsiyenti; K_p - konstruktiv parametr.



3-rasm. $K_I = 1,0$ bo‘lganda, toklar yo‘nalishi bir xil bo‘lgan ikkita qo‘shni shinadan maydonning urinma tashkil etuvchisi o‘zgarishining grafiklari.

Magnit maydon kuchlanishining urinma tashkil etuvchisi zanjirining har bir nuqtasida (6) tokli qo‘shni shinalardan farqli qiymatlarga ega bo‘lishi va (1) optimal statik xarakteristikating chiziqsizligi mavjud bo‘lganda, KFO‘ ni to‘liq integrallash amalga oshirilganda ham xatolikka olib keladi.

(6) tokli qo‘shni shinalardan va (1) optimal statik xarakteristikating nochiziqliligi mavjud bo‘lganda KFO‘ ni to‘liq integrallashni amalgaga oshirishda ham xatolikka olib keladi.

I_1 va I_2 tokli qo‘shni shinalarning ta’siridan kelib chiqadigan xatolikni tahlil uchun yetarli darajada aniqlikda quyidagi ifoda orqali aniqlash mumkin:

$$\Delta_{\Sigma o'rt} = \frac{\Delta E_{\Sigma o'rt}}{E_{max}} \quad (9)$$

bu yerda $\Delta E_{\Sigma o'rt}$ - o‘lchash chulg‘amida I_1 va I_2 tokli qo‘shni shinalardan kelayotgan magnit maydon kuchlanganligining urinma tashkil etuvchisi ta’sirida induksiyalangan KFO‘ ning o‘rtacha EYK;

E_{max} - o‘lchash chulg‘amida I_1 va I_2 tokli qo‘shni shinalardan kelayotgan magnit maydon kuchlanganligining urinma tashkil etuvchisi ta’sirida induksiyalangan KFO‘ ning maksimal o‘rtacha EYK bo‘lib, u $H_x = 0,7$ qiymatida o‘zaro teng bo‘ladi.

$$E_{max} = 0,65E_b \quad (10)$$

O‘ng taraf (7) ning qiymatini H_x (1) o‘rniga qo‘yib, (10) ni hisobga olgan holda va o‘lchov chulg‘amining har bir qismi bir nuqtada to‘planganligini e’tiborga olib, qo‘shni tokli shinalarning ta’siridan kelib chiqqan keltirilgan xatolik ifodasini quyidagi ko‘rinishda yozamiz:

$$\Delta_{\Sigma o'rt} = \frac{0,53}{m} \sum_{i=1}^m \left\{ 2 \operatorname{arctg} [H_{x_1} \sin(v_{d_1} \pm K_I v_{d_2})] - \operatorname{arctg} [H_{x_1} \sin(v_{d_1} \pm K_I v_{d_2}) - 1,65] - \operatorname{arctg} [H_{x_1} \sin(v_{d_1} \pm K_I v_{d_2}) + 1,65] \right\}. \quad (11)$$

Quyidagi funksiya belgilari bu yerda qabul qilinadi:

$$v_{d_1} = \frac{K_{d_1} \sin \frac{2\pi}{m} - 1}{1 + K_{d_1}^2 - 2K_{d_1} \sin \frac{2\pi}{m}} \quad (12)$$

$$v_{d_2} = \frac{K_{d_2} \sin \frac{2\pi}{m} + 1}{1 + K_{d_2}^2 + 2K_{d_2} \sin \frac{2\pi}{m}} \quad (13)$$

bu yerda m - o‘lchov chulg‘amining bo‘limlar soni.

(11) tenglamadagi musbat ishora I_1 va I_2 toklarning qarama-qarshi yo‘nalishiga mos keladi, manfiy ishora esa ularning bir xil yo‘nalishiga mos keladi.

(11) ifoda kompyuterda qo‘shni shinalarning toklari qarama-qarshi va mos yo‘nalishlarda bo‘lganda m = 6; 12; 18; $K_I = 1,0$ va $K_{d_1} = K_{d_2} = K_d = 1,5; 2,0; 2,5$ qiymatlari bilan hisoblab chiqildi.

Toklar va ularning qarama-qarshi yo‘nalishidagi qo‘shni shinalardan kelib chiqadigan maksimal xatolik (Δ_{max}) m = 6, $K_d = 1,5$ va $H_x = 1,2$ bo‘lganda 0,04% dan oshmaydi. Simmetrik joylashgan o‘lchov nuqtalarining juft soni ortishi bilan xatolik kamayadi.

Xulosa. Katta o‘zgarmas toklarni kontaktsiz usulda aniqlashga mo‘ljallangan keng diapazonli magnit-modulyatsiyalovchi ferromagnit o‘zgartirgich ishlab chiqildi. Taklif etilgan ushbu qurilma ixcham o‘lchamlarga, yengil og‘irlilikka va yuqori funksional samaradorlikka ega bo‘lib, turli sanoat va energetika tizimlarida uchraydigan o‘zgarmas va o‘zgaruvchan toklarning juda keng boshqariladigan diapazonini barqaror qayd etish imkonini beradi. O‘zgartirgichning konstruktiv yechimi sodda, texnologik va iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq bo‘lib, kam material sarfi, past tannarx, oson yig‘iluvchanlik va ekspluatatsiya jarayonida yuqori ishonchlilik bilan ajralib turadi.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, ishlab chiqilgan o‘zgartirgichning o‘lchash aniqligiga qo‘shni shinalarda oqib o‘tuvchi toklarning elektromagnit ta’siri sezilarli darajada ta’sir ko‘rsatadi. Biroq magnit zanjirda o‘lchash nuqtalarining soni o‘n ikkidan ortganida, bo‘limmalar sonining oz miqdordagi o‘zgarishi

o‘lchash natijasining barqarorligiga ta’sir qilmaydi. Bu esa qurilmaning tashqi magnit ta’sirlarga nisbatan yuqori immunitetga ega ekanini ko‘rsatadi.

Ishlab chiqilgan o‘zgartirgichning asosiy afzalligi — ishchi magnit oqim yo‘lida magnit qarshilikning bo‘ylama modulyatsiyasidan foydalinishdir. Ushbu yondashuv magnit maydondagi eng kichik o‘zgarishlarni ham samarali qayd etish imkonini berib, o‘zgartirgichning sezgirligini keskin oshiradi. Natijada KFO‘ (kontaktsiz ferromagnit o‘zgartirgich) past darajadagi signal kuchlarida ham yuqori aniqlikda ishlay oladi.

Amaliy qo‘llanish nuqtai nazaridan, ishlab chiqilgan o‘zgartirgich sanoat texnologik liniyalari, metallurgiya ishlab chiqarishlari, melioratsiya va sug‘orish tizimlari, qayta tiklanuvchi energiya manbalari (quyosh fotoelektr tizimlari, shamol

generatorlari)ni monitoring qilish, lazer va yuqori aniqlik talab qilinadigan texnologiyalarni boshqarish kabi ko‘plab sohalarda samarali foydalaniishi mumkin. Shuningdek, u elektr hisoblagichlarni ularning o‘rnatilgan joyida (in-situ) tekshirish, qiyoslash va diagnostika jarayonlarida yuqori qulaylik yaratib, 1,5% gacha bo‘lgan umumiy xatolik darajasida o‘zgarmas va o‘zgaruvchan toklarni kontaktsiz usulda aniqlash imkonini beradi.

Taklif etilgan o‘zgartirgichning ilmiy-texnik yondashuvi, yuqori sezgirlik, keng diapazonlilik va tashqi elektromagnit ta’sirlarga barqarorlik kabi afzalliklari uni zamonaviy nazorat va boshqaru tizimlari uchun istiqbolli qurilmalardan biriga aylantiradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

- [1] Lei, C. L., et al. (2020). Accounting for variability in ion current recordings using a mathematical model of artefacts in voltage-clamp experiments. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 378(2173), 20190348. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0348>
- [2] Plakhtiev, A. M. (2017). Effective informational contactless converters for modern monitoring and control systems in the agro-industrial complex. In Agricultural science for agriculture: International scientific and practical conference proceedings (pp. 37–39). Barnaul.
- [3] Chan, S., & Nopphawan, P. (2020). The challenges of clamp-on sensors for high-resolution phasor measurement unit applications. In 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) (pp. 190–193). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CMD48350.2020>
- [4] Mohns, E., et al. (2015). A current clamp-based high voltage monitoring system. In 2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) (pp. 13–18). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AMPS.2015.7312706>
- [5] Gabrišák, M., Hallon, J., & Bittera, M. (2025). Measurement uncertainty analysis for bulk current injection calibration process. Journal of Electrical Engineering, 76(5), 468–475.
- [6] Yang, Z., et al. (2024). Influence of input parameters on the measurement accuracy of external clamp-on ultrasonic flowmeters: An experimental study. Journal of Physics: Conference Series, 2853(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2853/1/012050>
- [7] Benesch, C., et al. (2015). How to assess the quality of glucose clamps? Evaluation of clamps performed with ClampArt, a novel automated clamp device. Journal of Diabetes Science and Technology, 9(4), 792–800. <https://doi.org/10.1177/1932296815586007>
- [8] Plakhtiev, A. M., Petrov, G. P., & Minikeev, H. S. (1980). Meter of large direct currents (SU Patent No. 792152; IPC G01R 19/00). Published December 30, 1980.
- [9] Plakhtiev, A., et al. (2023). High-current contactless ferromagnetic converters for multi-profile monitoring and control systems. E3S Web of Conferences, 401, 04015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340104015>
- [10] Плахтиев, А. М. (2022). Основные характеристики магнитомодуляционных бесконтактных измерительных преобразователей токов (pp. 1–5).
- [11] Gu, X., & Cegla, F. (2018). The effect of internal pipe wall roughness on the accuracy of clamp-on ultrasonic flowmeters. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 68(1), 65–72. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2847726>

- [12] Galliana, F., & Capra, P. P. (2012). Traceable technique to calibrate clamp meters in AC current from 100 to 1500 A. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(9), 2512–2518. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2196394>
- [13] Ding, Z., et al. (2020). A femoral clamp to reduce soft tissue artifact: Accuracy and reliability in measuring three-dimensional knee kinematics during gait. *Journal of Biomechanical Engineering*, 142(4), 044501. <https://doi.org/10.1115/1.4046367>
- [14] Nouri, B., et al. (2018). Characterization and corrections for clamp-on fluid temperature measurements in turbulent flows. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 10(3), 031011. <https://doi.org/10.1115/1.4039616>
- [15] Yang, Z., et al. (2024). Research on the influence of sensor installation arrangement on online measurement of external clamp-on ultrasonic flowmeter. In 2024 IEEE 6th International Conference on Advanced Information Management, Communications, Electronic and Automation Control (IMCEC) (Vol. 6, pp. 1547–1551). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMCEC59842.2024>