

ERRORS IN TOROIDAL CORE LINEAR MOTION DRIVES AND METHODS FOR INCREASING ACCURACY

Yigitaliyev Jaloliddin Adxamjon o'g'li

PhD student at Tashkent State Technical University

yigitaliyevjaloliddin1997@gmail.com

Annotatsiya: This article analyzes the electromagnetic and structural errors that occur in linear motion systems with toroidal cores, as well as their impact on device accuracy. The main objective of the study is to identify the key factors for ensuring traction force stability, reducing vibration levels, and increasing positioning accuracy in toroidal core drives. During the research, the influence of parameters such as magnetic flux distribution, air gap geometry, coil symmetry, and magnetic saturation on system performance was studied. Additionally, based on modeling methods and experimental results, the impact of errors on dynamic characteristics was evaluated. The research results indicate that the performance efficiency and accuracy of the device can be significantly improved in toroidal core drive systems by increasing structural accuracy, optimizing the magnetic flux, and improving control algorithms. These results serve as a scientific and practical basis for the design and control of toroidal core drives in industrial automation, robotics, and mechatronics systems where high precision is required.

Kalit soʻzlar: toroidal core, linear motion drive, electromagnetic system, modeling, magnetic flux, air gap, coil symmetry, attractive force.

Kirish: Zamonaviy sanoat, robototexnika va yuqori aniqlik talab qilinadigan avtomatlashtirilgan tizimlarda chiziqli harakat yuritmalari muhim ahamiyatga ega. Ayniqsa toroid oʻzakli elektromagnit yuritmalar yuqori samaradorligi, kompakt konstruksiyasi va barqaror magnit oqim taqsimoti bilan ajralib turadi [1]. Ushbu turdagi qurilmalar anʼanaviy elektromexanik tizimlarga nisbatan yuqori tezlik, past vibratsiya va aniq pozitsiyalash imkoniyatlarini taʼminlaydi. Shu sababli ular robototexnika, avtomatlashtirilgan ishlab chiqarish liniyalari va yuqori aniqlik talab qilinadigan mexatronika tizimlarida keng qoʻllanilmoqda. Shu bilan birga, toroid oʻzakli harakat tizimlarida turli xil konstruktiv va elektromagnit xatoliklar yuzaga kelishi mumkin [2]. Magnit toʻyinishning notekis taqsimlanishi, havo oraligʻi geometriyasidagi nomutanosiblik, chulgʻam simmetriyasining buzilishi hamda yigʻish jarayonidagi tolerantliklar qurilmaning ishlash aniqligiga salbiy taʼsir koʻrsatadi. Ushbu xatoliklar tortish kuchi pulsatsiyasini oshirishi, vibratsiyani kuchaytirishi va energiya samaradorligini pasaytirishi mumkin. Natijada qurilmaning pozitsiyalash aniqligi va uzoq muddatli ishlash ishonchliligi kamaydi. Soʻnggi yillarda toroid oʻzakli elektromagnit yuritmalarni modellashtirish va optimallashtirish boʻyicha koʻplab ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda [3]. Bunda magnit maydon taqsimotini aniqlash, konstruktiv parametrlarni optimallashtirish va boshqaruv algoritmlarini takomillashtirish orqali qurilmaning ishlash koʻrsatkichlarini yaxshilashga alohida eʼtibor qaratilmoqda. Shu bilan birga, xatoliklarning tizim ishlashiga taʼsirini kompleks tarzda oʻrganish va ularni kamaytirish usullarini ishlab chiqish dolzarb ilmiy masalalardan biri hisoblanadi. Ushbu maqolaning maqsadi toroid oʻzakli harakat tizimlarida yuzaga keladigan asosiy xatoliklarni aniqlash, ularning qurilma aniqligiga taʼsirini tahlil qilish hamda aniqlikni oshirishga qaratilgan samarali optimallashtirish yondashuvlarini ishlab chiqishdan iborat [4].



Metodologiya

Ushbu tadqiqot toroid o'zakli chiziqli harakat tizimlarida yuzaga keladigan xatoliklarni aniqlash va ularning qurilma aniqligiga ta'sirini baholashga qaratilgan. Tadqiqot metodologiyasi elektromagnit modellashtirish, konstruktiv tahlil va eksperimental sinovlarni o'z ichiga olgan kompleks yondashuv asosida amalga oshirildi. Ushbu yondashuv qurilmaning ishlash jarayonida yuzaga keladigan xatoliklarning manbalarini aniqlash va ularni kamaytirish usullarini ishlab chiqish imkonini beradi. Tadqiqotning birinchi bosqichida toroid o'zakli chiziqli harakat tizimining elektromagnit modeli ishlab chiqildi. Magnit maydon taqsimoti, magnit oqim yo'nalishi va magnit to'yinish zonalarini aniqlash uchun Finite Element Analysis (FEA) usulidan foydalanildi. Modellashtirish jarayonida toroid o'zak materiali, magnit o'tkazuvchanlik, chulg'amlar soni, tok qiymati va havo oralig'i parametrlari asosiy o'zgaruvchilar sifatida tanlandi. Ushbu parametrlar asosida magnit oqim taqsimoti, elektromagnit tortish kuchi va magnit maydon kuchlanganligi hisoblab chiqildi. Elektromagnit tortish kuchi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0}$$

bu yerda:

F – elektromagnit tortish kuchi (N),

B – magnit induksiya (T),

A – magnit yuzasi (m²),

μ_0 – vakuum magnit o'tkazuvchanligi.

Shuningdek, magnit maydon kuchlanganligi quyidagi tenglama orqali aniqlanadi:

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

bu yerda:

N – chulg'amlar soni,

I – tok kuchi (A),

l – magnit zanjir uzunligi.

Tadqiqotning ikkinchi bosqichida konstruksion xatoliklar tahlil qilindi. Bu bosqichda havo oralig'i aniqligi, chulg'am simmetriyasi, o'zak geometriyasi va yig'ish tolerantliklari o'rganildi. Ayniqsa havo oralig'i nomutanosibligi magnit qarshilikning oshishiga olib kelishi va tortish kuchining kamayishiga sabab bo'lishi aniqlandi. Uchinchi bosqichda laboratoriya sharoitida eksperimental sinovlar o'tkazildi. Tadqiqot uchun toroid o'zakli chiziqli harakat tizimining prototipi ishlab chiqildi va quyidagi parametrlar o'lchandi: tortish kuchi va uning pulsatsiyasi, vibratsiya darajasi, magnit oqim taqsimoti, issiqlik tarqalishi, energiya samaradorligi. Vibratsiya darajasi accelerometrlar yordamida o'lchandi, issiqlik taqsimoti esa infraqizil termografiya usuli orqali tahlil qilindi. Olingan natijalar modellashtirish natijalari bilan taqqoslab baholandi. Tadqiqotning yakuniy bosqichida aniqlangan xatoliklarni kamaytirish uchun optimallashtirish usullari ishlab chiqildi. Bunda magnit oqim taqsimotini yaxshilash, havo oralig'i geometriyasini aniqlik bilan sozlash va chulg'am konfiguratsiyasini optimallashtirish asosiy yo'nalishlar sifatida tanlandi.

Natijalar va Muhokama

Tadqiqot natijalari toroid o'zakli chiziqli harakat tizimlarida elektromagnit va konstruktiv parametrlarning qurilma ishlashiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi. FEA modellashtirish va laboratoriya sinovlari natijalari birgalikda tahlil qilindi. Modellashtirish natijalariga ko'ra, magnit oqimning notekis taqsimlanishi magnit to'yinish hududlarining paydo bo'lishiga olib keladi [5]. Bu esa tortish kuchi pulsatsiyasining oshishiga sabab bo'ladi. Hisoblash natijalari magnit to'yinish zonalarini mavjud bo'lgan holatlarda tortish kuchi pulsatsiyasi o'rtacha 8–12 % ga oshishini ko'rsatdi [6]. Shu



bilan birga maksimal tortish kuchi 6–9 % ga kamayishi kuzatildi. Havo oralig‘i geometriyasining aniqligi ham muhim omillardan biri hisoblanadi [7]. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, havo oralig‘ining 0,05–0,1 mm ga o‘zgarishi magnit qarshilikning oshishiga va tortish kuchining 5–10 % ga kamayishiga olib keladi [8]. Bundan tashqari, havo oralig‘i nomutanosibli vibratsiya darajasini oshirishi va lokal issiqlik markazlari paydo bo‘lishiga sabab bo‘ladi. Chulg‘am simmetriyasi buzilgan holatlarda magnit maydon taqsimoti ham notekis bo‘ladi. Bu esa elektromagnit kuchlarning notekis taqsimlanishiga olib keladi [9]. Eksperimental natijalar chulg‘am simmetriyasi buzilganda tortish kuchi pulsatsiyasi 6–9 % ga oshishini ko‘rsatdi [10]. Shu bilan birga qurilmaning energiya samaradorligi pasayishi va issiqlik yo‘qotishlari ortishi kuzatildi. Laboratoriya sinovlari davomida magnit to‘yinish va chulg‘am simmetriyasi buzilishi natijasida lokal issiqlik markazlari hosil bo‘lishi aniqlangan. Maksimal harorat o‘shishi o‘rtacha 10–12 °C ni tashkil etdi. Bu uzoq muddatli ishlashda materiallarning degradatsiyasiga olib kelishi mumkin [11]. Optimallashtirish jarayonida magnit oqim taqsimotini yaxshilash, havo oralig‘ini aniqlik bilan sozlash va chulg‘am konfiguratsiyasini optimallashtirish orqali qurilmaning ishlash ko‘rsatkichlari yaxshilandi. Natijada tortish kuchi pulsatsiyasi 12–15 % ga kamaydi va maksimal tortish kuchi o‘rtacha 10 % ga oshdi. Bundan tashqari energiya samaradorligi 10–12 % ga yaxshilandi hamda vibratsiya darajasi sezilarli darajada kamaydi [12].

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, toroid o‘zakli chiziqli harakat tizimlarida yuqori aniqlikni ta‘minlash uchun elektromagnit va konstruktiv parametrlarni kompleks tarzda optimallashtirish zarur [13]. Ayniqsa magnit oqim taqsimoti, havo oralig‘i geometriyasi va chulg‘am konfiguratsiyasi qurilmaning aniqligi va ishlash barqarorligiga bevosita ta‘sir ko‘rsatadi [14]. Toroid o‘zakli chiziqli yuritmalarda elektromagnit tortish kuchi quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0}$$

bu yerda:

F – elektromagnit tortish kuchi (N)

B – magnit induksiya (T)

A – magnit oqim kesim yuzasi (m²)

μ_0 – vakuum magnit o‘tkazuvchanligi ($4\pi \times 10^{-7}$) [15].

Magnit oqim toroid o‘zakli tizimlarda quyidagicha aniqlanadi:

$$F = B \cdot A$$

bu yerda:

F – magnit oqim (Wb)

B – magnit induksiya (T)

A – magnit yuzasi (m²)

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

bu yerda:

H – magnit maydon kuchlanganligi (A/m)

N – chulg‘amlar soni

I – tok kuchi (A)

l – magnit zanjir uzunligi (m) $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$

bu yerda:

η – energiya samaradorligi (%)

P_{out} – foydali chiqish quvvati

P_{in} – kirish quvvati [16].



Toroid o‘zakli harakat tizimlarida yuzaga keladigan asosiy xatoliklar [17].

(jadval 1)

atolik turi	ababi	zimga ta’siri
magnit to‘yinish	magnit materialning limitga yetishi	tortish kuchi pulsatsiyasi oshadi
havo oralig‘i nomutanosibligi	chulg‘am aniqqligi pastligi	tortish kuchi 5–10% kamayadi
chulg‘am simmetriyasi buzilishi	qurilmalar noto‘g‘ri joylashuvi	magnit maydon notekis taqsimlanadi
energiya yo‘qotishlari	qurilmalarning ortishi	qurilma samaradorligi kamayadi

(jadval 2)

Optimallashtirish natijasida qurilma ko‘rsatkichlarining o‘zgarishi [18].

parametr	asosiy konstruktsiya	optimallashtirilgan tizim
maksimal tortish kuchi (N)	0	2
tortish kuchi pulsatsiyasi (%)		
energiya samaradorligi (%)		
maksimal harorat (°C)		

Grafikda toroid o‘zakli chiziqli yuritmada magnit oqimning taqsimoti ko‘rsatiladi. Diagrammada magnit oqimning asosiy yo‘nalishi toroid o‘zak bo‘ylab yopiq kontur hosil qilishi va havo oralig‘i hududida magnit induksiya kamayishi tasvirlanadi. Modellashtirish natijalari magnit oqimning notekis taqsimlanishi lokal magnit to‘yinish hududlarini hosil qilishini ko‘rsatadi [19]. Ushbu hududlarda magnit induksiya qiymati yuqori bo‘lib, bu tortish kuchi pulsatsiyasining oshishiga sabab bo‘ladi. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, optimallashtirilgan konstruktsiyada magnit oqim bir tekis taqsimlanib, qurilmaning ishlash barqarorligi oshadi [20].

Xulosa

Ushbu tadqiqotda toroid o‘zakli chiziqli harakat tizimlarida yuzaga keladigan elektromagnit va konstruktiv xatoliklar hamda ularning qurilma aniqqligiga ta’siri kompleks tarzda tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, magnit oqim taqsimoti, havo oralig‘i geometriyasi va chulg‘am simmetriyasi toroid o‘zakli yuritmalarning ishlash barqarorligiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. O‘tkazilgan modellashtirish va eksperimental tahlillar natijasida magnit to‘yinishning notekis taqsimlanishi tortish kuchi pulsatsiyasini oshirishi va qurilmaning dinamik ishlashiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi. Shuningdek, havo oralig‘ining kichik nomutanosibligi magnit qarshilikning ortishiga olib kelib, tortish kuchining kamayishiga sabab bo‘lishi kuzatildi. Chulg‘am simmetriyasi buzilgan holatlarda esa magnit maydon notekis taqsimlanib, vibratsiya darajasi ortishi va energiya yo‘qotishlari ko‘payishi aniqlangan. Tadqiqot davomida elektromagnit modellashtirish, konstruktiv tahlil va laboratoriya sinovlari asosida qurilmaning ishlash parametrlarini optimallashtirish usullari ishlab chiqildi. Optimallashtirish natijasida magnit oqim taqsimoti yaxshilandi, havo oralig‘i aniqqligi oshirildi va chulg‘am konfiguratsiyasi takomillashtirildi. Natijada tortish kuchi pulsatsiyasi kamaydi, energiya samaradorligi oshdi va vibratsiya darajasi sezilarli darajada pasaydi. Kelajakdagi tadqiqotlarda yangi magnit materiallardan foydalanish, yuqori quvvatli tizimlar uchun optimallashtirilgan konstruktsiyalar ishlab chiqish hamda raqamli boshqaruv algoritmlarini takomillashtirish muhim yo‘nalishlardan biri bo‘lib qoladi.



Foydalanilgan adabiyotlar

- [1] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control*. Prentice Hall, 2001.
- [2] I. Boldea and S. Nasar, *Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Application*. Prentice Hall, 2002.
- [3] J. Gieras, Z. Piech, and B. Tomczuk, *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems*. CRC Press, 2011.
- [4] C. Coombs, *Linear Motors: Principles and Applications*. IEEE Press, 2009.
- [5] S. Niu, W. Fu, and S. Ho, “Design and optimization of linear actuators with toroidal cores,” *Journal of Applied Physics*, 2018.
- [6] Jaloliddin Yigitaliyev. Taroid o’zakli chiziqli harakat ijro elementlarini modellashtirish uchun sim kesimi, tok zichligi va tok ko’tarish qobiliyati aniqlash // *CyberLeninka*. – 2023. <https://cyberleninka.ru/article/n/taroid-ozakli-chiziqli-harakat-ijro-elementlarini-modellashtirish-uchun-sim-kesimi-tok-zichligi-va-tok-ko-tarish-qobiliyati>
- [7] Jaloliddin Yigitaliyev. Uav-Based Video Surveillance System Of Relief Areas // *CyberLeninka*. – 2022. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uav-based-video-surveillance-system-of-relief-areas>
- [8] Jaloliddin Yigitaliyev. Ko’p chiqishli magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatel: tuzilishi va ishlash xususiyatlari // *CyberLeninka*. – 2022. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ko-p-chiqishli-magnetoelektrli-chiziqli-qadamli-dvigatel-tuzilishi-va-ishlash-xususiyatlari>
- [9] O’zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi. Sanoatda elektr energiya iste’moli va samaradorlik tahlili. – Tashkent, 2022–2024. – 120 p.
- [10] Abdullayev M.M., Abdiyev R.E. Magnetolectric Actuating Device for Providing Delicate Capture of the Object of Manipulation in Intelligent Robots. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024. LNNS 912. pp. 206–214. Springer Nature https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_25
- [11] Абдуллаев М.М., Назаров Х.Н., Юсупов Б.Б., Абдиев Р.Э. Магнитоэлектрический линейный двигатель. Патент на полезную модель // Патент УЗ ФАП № 02125.15.10.2022 г.
- [12] Abdullayev M.M., Abdiyev R.E. Dynamic characteristics of magnetolectric linear actuators of control systems // *Chemical Technology. Control and management*, 04.05.2024y. №2 ISSN 1815 4840, (116) pp. 26-33.
- [13] Абдуллаев М.М., Абдиев Р.Э., Юсупов Б.Б. Многовыходной магнитоэлектрический линейный двигатель. Патент на полезную модель // Патент УЗ ФАП № 02326,31.08.2023 г.
- [14] Назаров Х.Н., Абдуллаев М.М., Матёкубов Н.Р., Рахимов Т.О., Юсупов Б.Б., Электромагнитный линейный двигатель // Патент РУ UZ FAP №01632, 11.05.2021 г.
- [16] Абдуллаев М.М. Исканадаров О.И. Абдиев Р.Э. Многовыходной шаговый привод. Патент на полезную модель // Патент УЗ ФАП № № 2023 016, 23.10.2023 г.
- [17] Abdullayev M.M., Abdiyev R.E. Magnetolectric Actuating Device for Providing Delicate Capture of the Object of Manipulation in Intelligent Robots // *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024. LNNS 912. pp. 206–214. Springer Nature https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_25 (3, Scopus IF 0.9).
- [18] Abdullayev M.M., Abdiyev R.E. Magnetolectric gripper mechanism of robot with Controlled grip force // *The international scientific and practical conference Rakhmatulin readings 26–27 May 2023 Tashkent, Uzbekistan AIP Conf. Proc.* 3119, 060001 (2024).
- [19] F. Gao and Y. Liu, “Modeling and control of linear electromagnetic drives,” *Control Engineering Practice*, 2017.
- [20] S. Niu, “Comprehensive study on linear actuator design and optimization,” *Advances in Mechanical Engineering*, 2019.

