

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

Abstract: 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.

Keywords: 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 o'zakli elektromagnit yuritmalar yuqori samaradorligi, kompakt konstruksiyasi va barqaror magnit oqim taqsimoti bilan ajralib turadi [1]. Ushbu turdagi qurilmalar an'anaviy elektromexanik tizimlarga nisbatan yuqori tezlik, past vibratsiya va aniq pozitsiyalash imkoniyatlarini ta'minlaydi. Shu sababli ular robototexnika, avtomatlashtirilgan ishlab chiqarish liniyalari va yuqori aniqlik talab qilinadigan mexatronika tizimlarida keng qo'llanilmoqda. Shu bilan birga, toroid o'zakli harakat tizimlarida turli xil konstruktiv va elektromagnit xatoliklar yuzaga kelishi mumkin [2]. Magnit to'yinishning notekis taqsimlanishi, havo oralig'i geometriyasidagi nomutanosiblik, chulg'am simmetriyasining buzilishi hamda yig'ish jarayonidagi tolerantliklar qurilmaning ishlash aniqligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Ushbu xatoliklar tortish kuchi pulsatsiyasini oshirishi, vibratsiyani kuchaytirishi va energiya samaradorligini pasaytirishi mumkin. Natijada qurilmaning pozitsiyalash aniqligi va uzoq muddatli ishlash ishonchligi kamaydi. So'nggi yillarda toroid o'zakli elektromagnit yuritmalarni modellashtirish va optimallashtirish bo'yicha ko'plab ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda [3]. Bunda magnit maydon taqsimotini aniqlash, konstruktiv parametrlarni optimallashtirish va boshqaruv algoritmlarini takomillashtirish orqali qurilmaning ishlash ko'rsatkichlarini yaxshilashga alohida e'tibor qaratilmoqda. Shu bilan birga, xatoliklarning tizim ishlashiga ta'sirini kompleks tarzda o'rganish va ularni kamaytirish usullarini ishlab chiqish dolzarb ilmiy masalalardan biri hisoblanadi. Ushbu maqolaning maqsadi toroid o'zakli harakat tizimlarida yuzaga keladigan asosiy xatoliklarni aniqlash, ularning qurilma aniqligiga ta'sirini tahlil qilish hamda aniqlikni oshirishga qaratilgan samarali optimallashtirish yondashuvlarini ishlab chiqishdan iborat [4].

Metodologiya



Kielce 2026

Ushbu tadqiqot toroid o‘zakli chizikli 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 chizikli 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 chizikli 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



Kielce 2026

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 zonalari 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 nomutanosibligi 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'sishi 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'rsatdiki, 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 \

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

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

Xatolik turi	Sababi	Tizimga ta’siri
Magnit to‘yinish	Magnit materialning limitga yetishi	Tortish kuchi pulsatsiyasi oshadi
Havo oralig‘i nomutanosibligi	Yig‘ish aniqligi pastligi	Tortish kuchi 5–10% kamayadi
Chulg‘am simmetriyasi buzilishi	O‘ramlar noto‘g‘ri joylashuvi	Magnit maydon notekis taqsimlanadi
Issqlik yo‘qotishlari	Tokning ortishi	Qurilma samaradorligi kamayadi

Jadval 2. Optimallashtirish natijasida qurilma ko‘rsatkichlarining o‘zgarishi [18].

Parametr	Oddiy konstruktsiya	Optimallashtirilgan tizim
Maksimal tortish kuchi (N)	210	232
Tortish kuchi pulsatsiyasi (%)	14	9
Energiya samaradorligi (%)	78	88
Maksimal harorat (°C)	72	60

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 aniqligiga 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 nomutanosibliigi 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 aniqligi 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] J. Kim and S. Park, "Magnetic flux distribution analysis in linear electromagnetic actuators," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017.
- [7] Y. Zhang and X. Li, "Influence of air gap geometry on linear motor performance," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018.
- [8] C. Wu and H. Liu, "Vibration analysis of linear electromagnetic actuators," *Journal of Sound and Vibration*, 2019.
- [9] Q. Chen and L. Wang, "Thermal effects in linear electromagnetic actuators," *Applied Thermal Engineering*, 2020.
- [10] S. Lee and H. Kim, "Experimental evaluation of linear motors with toroidal cores," *Measurement*, 2019.
- [11] H. Gao, "Electromechanical modeling of linear actuators," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017.
- [12] J. Han, "Dynamic analysis of linear actuators for precision systems," *ASME Transactions on Mechatronics*, 2020.
- [13] S. Park and J. Choi, "Optimization of linear motor configurations using finite element analysis," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2018.
- [14] X. Li and Y. Chen, "Energy efficiency improvement in linear electromagnetic actuators," *Energy Conversion and Management*, 2020.



Kielce 2026

- [15] S. Kulkarni, "Finite element analysis of linear motors," *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016.
- [16] Z. Xu and Q. Wang, "Numerical investigation of linear electromagnetic actuators," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021.
- [17] Y. Chen, "Magnetic saturation effects in high precision linear motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019.
- [18] H. Kim and J. Lee, "Impact of core geometry on electromagnetic actuator performance," *Journal of Mechanical Design*, 2018.
- [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.

