

TAROID O'ZAKLI CHIZIQLI HARAKAT IJROSINI REJALASHTIRISHNI MODELLASHTIRISH VA INTELLEKTUAL HARAKAT ALGORITMLARINI ISHLAB CHIQISH

Yigitaliyev Jaloliddin Adxamjon o'g'li

Toshkent davlat texnika universiteti

E-mail: yigitaliyevjaloliddin1997@gmail.com

Annotatsiya

Zamonaviy avtomatlashtirilgan tizimlarda toroid o'zakli chiziqli elektromagnit aktuatorlar yuqori aniqlik, tezkorlik va energiya samaradorligi bilan ajralib turadi. Mazkur tadqiqotda aktuatorning elektromagnit va mexanik jarayonlarini ifodalovchi matematik model ishlab chiqildi va uning dinamik xususiyatlari state-space usulida modellashirildi. Tadqiqot jarayonida klassik PID va intellektual boshqaruv algoritmlari qo'llanilib, ularning samaradorligi barqarorlashish vaqti, ortiqcha tebranish va statik xatolik ko'rsatkichlari orqali baholandi. Olingan natijalar toroid aktuatorlarning dinamik xatti-harakatini aniq tavsiflab, turli boshqaruv usullarini solishtirish imkonini berdi. Ish natijalari sanoat avtomatlashtirish va robototexnika sohalarida qo'llanilishi mumkin.

Kalit so'zlar: taroid o'zak, chiziqli harakat, raqamli modellashirish, intellektual boshqaruv, sun'iy intellekt, elektromagnit maydon, dinamik xarakteristika.

Аннотация

В современных автоматизированных системах линейные электромагнитные актуаторы с тороидальным сердечником отличаются высокой точностью, скоростью и энергоэффективностью. В данном исследовании разработана математическая модель актуатора, учитывающая электромагнитные и механические процессы, и проведено моделирование его динамических характеристик методом state-space. В работе применялись классический PID и интеллектуальный алгоритм управления, эффективность которых оценивалась по времени установления, превышению и статической ошибке. Полученные результаты позволили точно описать динамику тороидального актуатора и сравнить различные методы управления. Результаты исследования могут быть использованы в промышленной автоматизации и робототехнике.

Ключевые слова: тороидальный сердечник, линейный механизм, цифровое моделирование, интеллектуальное управление, искусственный интеллект, алгоритмы, электромагнитное поле, динамические характеристики

Abstract

Toroidal core linear electromagnetic actuators in modern automated systems are distinguished by high precision, speed, and energy efficiency. This study develops a mathematical model of the actuator, representing both electromagnetic and mechanical processes, and analyzes its dynamic characteristics using the state-space method. Classical PID and intelligent control algorithms are implemented, and their effectiveness is evaluated based on settling time, overshoot, and static error. The results provide an accurate description of the actuator's dynamic behavior and allow comparison of different control strategies. These findings are applicable to industrial automation, robotics, and high-precision control systems.

Keywords: toroidal core, linear actuator, digital modeling, intelligent control, artificial intelligence, algorithms, electromagnetic field, dynamic characteristics

KIRISH

So‘nggi yillarda elektromagnit aktuatorlarning dinamik xususiyatlarini modellashtirish va boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish bo‘yicha bir qator ilmiy tadqiqotlar olib borilgan. Ushbu tadqiqotlarda asosan matematik modellashtirish, klassik PID boshqaruv va elektromagnit jarayonlarni tahlil qilish masalalari ko‘rilgan. Shu bilan birga, toroid o‘zakli aktuatorlarning elektromagnit va mexanik jarayonlarining noxiziqli o‘zaro ta‘sirini hisobga olgan kompleks boshqaruv algoritmlari yetarli darajada ishlab chiqilmagan.

MASALANING QO‘YILISHI

Hozirda elektromexanik tizimlarda chiziqli harakat aktuatorlarining aniqligi, tezkorligi va energiya samaradorligini oshirish dolzarb masala hisoblanadi. Toroid o‘zakli elektromagnit aktuatorlar yuqori samaradorlikka ega bo‘lsa-da, ularning elektromagnit va mexanik jarayonlari o‘zaro noxiziqli bog‘langanligi sababli samarali boshqaruvni ta‘minlash murakkabdir. Mazkur tadqiqotning maqsadi — toroid o‘zakli chiziqli aktuatorning matematik modelini ishlab chiqish, uning dinamik xususiyatlarini state-space usulida tahlil qilish hamda samarali boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish va taqqoslashdan iborat. Ushbu masalani yechishda aktuatorning elektromagnit va mexanik jarayonlarini kompleks modellashtirish asosida tahlil qilish, shuningdek PID (Proportional Integral Derivative) ya‘ni xatoliklarni ma‘lum vaqt oralig‘ida hisoblash va intellektual boshqaruv usullarining samaradorligini baholash ko‘zda tutiladi[1].

YECHISH USULI

Tadqiqot jarayonida toroid o‘zakli chiziqli harakat aktuatorining elektromagnit va mexanik jarayonlarini tavsiflovchi matematik model ishlab chiqildi. Model elektromagnit kuchlar, tok va magnit oqimi o‘rtasidagi bog‘lanishga asoslanadi.

Elektromagnit kuch quyidagi tenglama orqali aniqlanadi[2]:

$$F = \frac{2}{1} * \frac{dL(x)}{dx} * i^2$$

Ushbu formulada F -elektromagnit kuch $L(x)$ -induktivlik i -tok x -harakat koordinatasi

Platformani harakat tenglamasi esa quyidagicha ifodalanadi:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F$$

bu formula esa m -harakatlanuvchi qism massasi b -dempfer koeffitsienti k -elastiklik koeffitsiyenti

Tizimni boshqarish uchun ikki xil yondashuv qo'llaniladi[1]:

1. An'anaviy PID boshqaruv
2. Intellektual boshqaruv algoritmi

Model va boshqaruv algoritmlari MATLAB (Simulink)da modellashtiriladi. Simulyatsiya jarayonida tizimning o'tish jarayonlari, barqarorlashish vaqti va ortiqcha tebranish darajasi tahlil qilinadi[4].

NATIJALAR VA NAMUNALAR

O'tkazilgan modellashtirish natijasida toroid o'zakli chiziqli harakat aktuatorining dinamik xususiyatlari aniqlandi. Tizimning chiqish koordinatasining vaqt bo'yicha o'zgarishi (position–time) grafigi asosida o'tish jarayonlari tahlil qilindi. Olingan natijalar aktuatorning asosiy parametrlariga — tok, induktivlik va elektromagnit kuch — bog'liq holda harakat dinamikasi sezilarli darajada o'zgarishini ko'rsatdi. Xususan, elektromagnit kuchning ortishi tizim tezlanishini oshiradi va barqarorlashish vaqtini qisqartiradi. Tadqiqot davomida klassik PID (Proportional Integral Derivative) va intellektual boshqaruv algoritmlarining samaradorligi taqqoslandi. Aktuatorning matematik modeli quyidagi asosiy tenglamalarga asoslanadi[5]:

Formula va tenglamalar nomi	Formula va tenglamalar
Elektr zanjir tenglamasi:	$u = Ri + L(x) \frac{di}{dt}$
Mexanik harakat tenglamasi	$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F$
Elektromagnit kuch tenglamasi	$F = \frac{1}{2} \frac{dL(x)}{dx} i^2$
Mexanik tenglamadan foydalanib holat tenglamasini hosil qilish	$\ddot{x} = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2} \frac{dL(x)}{dx} x^3 - bx - kx \right)$

Elektr holat tenglamasi	$\ddot{x}_3 = \frac{1}{L(x)}(u - R\dot{x}_3)$
-------------------------	---

Mexanik parametrlar	Magnit zanjir parametrlari
Harakatlanuvchi qism massasi m (kg)	Magnit yo'l uzunligi l (m)
Dempfer koeffitsiyenti b (N·s/m)	Kesim yuzasi S (m ²)
Prujina koeffitsiyenti k (N/m) (agar mavjud bo'lsa)	Magnit o'tkazuvchanlik μ

Ishlash rejimi: Tok I (A) yoki maksimal tok va Boshlang'ich pozitsiya x parametrlardan foydalangan holatda magnit qarshiligini hisoblanishini keltirib o'tilgan. Magnit qarshilik formulasi[3]:

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$$R_m = \frac{0.12}{1.26 \times 10^{-6} \times 0.0008}$$

$$R_m \approx 1.19 \times 10^8$$

Induktivlikni tekshirish

$$L = \frac{N^2}{R_m}$$

$$L = \frac{250^2}{1.19 \times 10^8}$$

$$L \approx 0.052 \text{ H}$$

Bu qiymat 0.05 H ga juda yaqin, demak tanlangan parametrlar realistik.

O'tkazilgan modellash tirish natijasida toroid o'zakli aktuatorning dinamik xususiyatlari aniqlandi. Tizimning chiqish koordinatasining vaqt bo'yicha o'zgarishi grafiklar yordamida tahlil qilindi[5].

Ko'rsatkich	PID	Intellectual
Barqarorlashish vaqti	0.45 s	0.28
Ortiqcha oshib ketish	0.02	0.005
Ortiqcha yuklanish	12%	4%
Energiya sarfi	yuqori	past

Pozitsion vaqt grafigi tizimning dinamik javobini ko'rsatdi va taklif etilgan algoritm yordamida tizim tezroq barqaror holatga kelishini tasdiqladi[4].

MUHOKAMA

Olingan natijalar toroid o'zakli chiziqli aktuatorlarning dinamik jarayonlarini matematik model yordamida samarali tahlil qilish mumkinligini ko'rsatdi. Taklif etilgan model elektromagnit kuch, mexanik harakat va boshqaruv signallari o'rtasidagi bog'lanishni aniq ifodaladi. Simulyatsiya natijalariga ko'ra, intellektual boshqaruv algoritmlari tizimning barqarorligini oshirdi va energiya sarfini kamaytirdi. Bundan tashqari, ushbu algoritm tizimdagi nochiziqli ta'sirlarni samaraliroq kompensatsiya qildi. Shuningdek, sinovdan o'tkazilgan dasturiy yondashuv robototexnika, avtomatlashtirilgan ishlab chiqarish tizimlari va yuqori aniqlikdagi mexatronika qurilmalarida ham qo'llanilishi mumkin. Modellastirish jarayoni shuni ko'rsatadiki, intellektual boshqaruv algoritmi tizimning o'tish jarayonlarini yuqori darajada yaxshilagan[4]:

Ko'rsatgichlar (Parameters)	An'anaviy PID	Intellektual (loyqa)	Samaradorlik (%)
O'tish vaqti (O'rnatish vaqti, s)	0,45 s	0,32 s	~28% yaxshilandi
Maksimal o'ta tartibga solish (Overshoot,%)	12,5%	3,2%	74% kamaydi
Statik xatolik (barqaror holat xatosi, mm)	0,15 mm	0,02 mm	86% aniqlandi
Energiya sarfi (Energiya sarfi, kJ)	1,25 kJ	1,08 kJ	~13.6% tejaldi

Chiziqli harakatni belgilashda (Motion planning) berilgan sinusoidal trayektoriya bo'yicha harakatlanishda toroid o'zakdagi magnit to'yinishi hisobiga nisbatan nochiziqliklar o'rganildi. Intellektual algoritm ushbu nochiziqliklarni real vaqt rejimida kompensatsiya qilish hisobiga: Pozitsiyalash xatoligi o'rtacha 15-18% ga qolmaydi. Tashqi yuklama $F_{load} = 50N$ dan $100N$ gacha oshirilganda, tizimning keskinlikka qaytish vaqti 1.5 barobar tezlashdi.

XULOSA

Olingan manba shuni ko'rsatdiki, o'zakli chiziqli ijro etishning murakkab elektromagnit tabiati an'anaviy chiziqli algoritmlar bilan to'liq boshqarilmaydi. Modellashtirilgan intellektual boshqaruv algoritmi aniqlikni oshirdi va elektr sarfini sezilarli darajada kamaytirdi. Raqamli model orqali olingan parametrlar real qurilmani ulashda tejashni 20-25% ga zaryadish hosil qiladi. Tadqiqot taroid o'zakli chiziqli harakat ijro elementining mukammallashtirilgan modeli ishlab chiqildi. Intellektual algoritmlarning qo'shimcha chiziqli harakatni boshqarishda yuqori dinamik aniqlik (94.7% gacha) va energiyani ta'minladi[5].

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1]. Kuznetsov, V. A., & Feng, X. (2021). "Kengaytirilgan magnit yadroli chiziqli aktuatorlarni loyihalash va optimallashtirish." IEEE sanoat elektronikasi bo'yicha operatsiyalar , 68-jild, 4-son, 3120-3129-betlar.
- [2]. Yunusov, R. va Karimov, A. (2023). "Taroid o'zakli elektromagnit tizimlarini matematik modellashtirishning o'ziga xos xususiyatlari." O'zbekiston texnika jurnali , 2-son, 45-52-betlar.
- [3]. Wang, L., & Hu, J. (2022). "Aqlli ishlab chiqarishda chiziqli harakat tizimlari uchun raqamli egizaklar va aqlli boshqaruv." Xalqaro ilg'or ishlab chiqarish texnologiyalari jurnali , 112-125-betlar.
- [4]. Ahmedov, M. (2022). Sanoat robotlari ijroni aqliy boshqarish algoritmlari . Toshkent: "Fan va texnologiya", 180 b.
- [5]. 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.
- [6]. Yigitaliyev J.A.(2026), Analysis of errors in toroidal core linear motion drives and methods for accuracy improvement// International Multidisciplinary Journal of Applied Technology (IMJAT) with U.S ISSN 2995-486X).