

**TAROID O'ZAKLI CHIZIQLI HARAKAT IJRO ELEMENTLARINI
MODELLASHTIRISH UCHUN SIM KESIMI, TOK ZICHLIGI VA TOK KO'TARISH
QOBILİYATI ANIQLASH**

**Yigitaliyev Jaloliddin Adxamjon o'g'li, Abdullayev Mahmudjon Muxamedovich, Abdiyev
Rasul Ernazar o'g'li**

Toshkent Davlat Texnika Universiteti

E-mail: yigitaliyevjaloliddin1997@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17938755>

Annotatsiya: Ushbu maqolada taroid o'zakli yuritmani chiziqli dvigatel o'ramlari tuzilmasi modellashtiriladi, o'ram simining optimal elektrik parametrlari hisoblab chiqiladi va dvigatel konstruksiyasining amaliy ishlash xususiyatlariga ta'siri tahlil qilinadi. Tadqiqotning alohida qismi sifatida sim diametri 2 mm bo'lgan o'tkazgichning kesim maydoni, tok zichligi diapazonlari va ruxsat etilgan tok qiymatlari aniqlanadi hamda standart jadvallar bilan taqqoslanadi. Natijalar dvigatelning barqaror ishlashi, issiqlik boshqaruvi va maksimal elektromagnit kuchni shakllantirish uchun zarur bo'lgan optimal parametrlarni tanlash imkonini beradi. Mazkur ish taroid o'zakli yuritmani loyihalash va ularning elektromagnit modellarini takomillashtirish bo'yicha ilmiy–amaliy asos yaratadi, shuningdek, yuqori aniqlikdagi mexatronik tizimlarda ularni qo'llash samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: Taroid, sim diametri, tok, zichlik, yuritma, diapazonlar, kuchlanish, magnit maydon, oqim, o'ram, ferromagnet, magnit qarshilik.

**DETERMINATION OF WIRE CROSS-SECTION, CURRENT DENSITY, AND
CURRENT-CARRYING CAPACITY FOR MODELING TOROIDAL-CORE LINEAR
MOTION ACTUATOR ELEMENTS**

**Yigitaliyev Jaloliddin Adxamjon o'g'li, Abdullayev Mahmudjon Muxamedovich, Abdiyev
Rasul Ernazar o'g'li**

Tashkent State Technical University

E-mail: yigitaliyevjaloliddin1997@gmail.com

Abstract: In this article, the structure of linear motor windings with a toroidal core is modeled, the optimal electrical parameters of the winding wire are calculated, and their impact on the practical operating characteristics of the motor design is analyzed. As a separate part of the study, the cross-sectional area, current density ranges, and permissible current values of a conductor with a wire diameter of 2 mm are determined and compared with standard tables. The results make it possible to select optimal parameters necessary for stable motor operation, thermal management, and the generation of maximum electromagnetic force. This work provides a scientific and practical basis for designing toroidal-core actuators and improving their electromagnetic models, as well as enhancing their efficiency in high-precision mechatronic systems.

Keywords: Toroid, wire diameter, current, density, actuator, ranges, voltage, magnetic field, flux, winding, ferromagnet, magnetic resistance.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДА, ПЛОТНОСТИ ТОКА И ТОКОНЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ С ТОРОИДАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ**

**Йигиталиев Жалолиддин Адхамджонович, Абдуллаев Махмуджон Мухамедович,
Абдиев Расул Эрназар ўгли**

Ташкентский государственный технический университет

E-mail: yigitaliyevjaloliddin1997@gmail.com

Аннотация: В данной статье моделируется структура обмоток линейного двигателя с тороидальным сердечником, рассчитываются оптимальные электрические параметры обмоточного провода и анализируется их влияние на практические эксплуатационные характеристики конструкции двигателя. В отдельной части исследования определяются площадь поперечного сечения, диапазоны плотности тока и допустимые значения тока для проводника диаметром 2 мм, а также выполняется их сравнение со стандартными таблицами. Полученные результаты позволяют выбрать оптимальные параметры, необходимые для стабильной работы двигателя, эффективного теплового управления и формирования максимальной электромагнитной силы. Данная работа создаёт научно-практическую основу для проектирования приводов с тороидальным сердечником и совершенствования их электромагнитных моделей, а также способствует повышению эффективности их применения в высокоточных мехатронных системах.

Ключевые слова: Тороида, диаметр провода, ток, плотность, привод, диапазоны, напряжение, магнитное поле, поток, обмотка, ферромагнит, магнитное сопротивление.

KIRISH

Zamonaviy mexatronik va avtomatlashtirilgan tizimlarda chiziqli dvigatellar yuqori aniqlik, tezkor javob berish va yuqori samaradorlik talab etiladigan jarayonlarda muhim o‘rin egallaydi. Taroid o‘zakli yuritmalar (toroidal core actuators) esa kichik o‘lcham, yuqori elektromagnit samaradorlik va past energiya yo‘qotishlari tufayli chiziqli dvigatellar konstruksiyasida keng qo‘llanilmoqda. Bunday qurilmalarda o‘ram simlarining to‘g‘ri tanlanishi, xususan, simning kesim maydoni, tok zichligi va tok ko‘tarish qobiliyati dvigatelning ishonchli ishlashi hamda energiya samaradorligini ta‘minlashda hal qiluvchi omillardan biridir. O‘ramlarni loyihalashda sim diametrining fizik–elektrik xususiyatlarga ta‘sirini chuqur o‘rganish muhim bo‘lib, noto‘g‘ri tanlangan elektr parametrlar dvigatelning issiqlik rejimi buzilishiga, elektromagnit kuchning pasayishiga yoki qisqa tutashuv xavfining ortishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli, sim kesimining optimal qiymatini aniqlash, tok zichligining ruxsat etilgan diapazonlarini baholash va o‘tkazgichning tok ko‘tarish qobiliyatini aniqlash chiziqli dvigatelning samarali va xavfsiz ishlashini ta‘minlaydi. Mazkur maqolada taroid o‘zakli yuritma uchun o‘ram simining elektr parametrlarini hisoblash, ularning elektromagnit jarayonlarga ta‘sirini tahlil qilish va amaliy konstruksiya talablariga mos ravishda optimal qiymatlarni belgilash maqsad qilib olingan.

ASOSIY QISM

Olingan natijalar yuqori aniqlikdagi mexatronik qurilmalarda qo‘llaniladigan chiziqli dvigatellarni yanada takomillashtirish, ularning ishonchligi va samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Belgilar va geometriya Yuritmani asosiy formulalarini va tanlab olingan parametrlarini belgilanishi:

a — toroidning ichki radiusi (m).

b — toroidning tashqi radiusi (m).

h — toroid kesimining “balandligi” (yoki qalinligi) (m).

A_m — magnit yoʻlining kesim maydoni (m^2). (Agar kesim toʻgʻri burchakli boʻlsa: $A_m = h \cdot (b - a)$).

r_m - oʻrtacha radius $r_m = \frac{a+b}{2}$.

l_m - magnit yoʻlining oʻrtacha uzunligi $l_m = 2\pi r_m$.

N - oʻramdagi oʻramlar soni (turns).

d_w - oʻram simi diametri (m). (Siz ilgari 2 mm bergansiz: $d_w = 2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$).

A_w - simning kesim maydoni (m^2), $A_w = \frac{\pi d_w^2}{4}$.

ρ - oʻtkazgichning resistivligi ($m \cdot \Omega$). Misol: mis uchun $\rho \approx 1.724 \times 10^{-8}$ (20°C).

R - oʻramning qarshiligi (Ω).

J - tok zichligi (A/m^2). (Agar kerak boʻlsa A/mm^2 koʻrinishida ham ishlatamiz).

μ_0 - boʻshliqning magnit doimiyligi = $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

μ_r - yadroning nisbiy magnetik oʻtkazuvchanligi. Yadro uchun $\mu = \mu_0 \mu_r$.

\mathcal{R} - magnit qarshilik (reluctance) (A/Wb yoki H^{-1}).

Φ - magnit oqim (Wb).

L - oʻram induktivligi (H).

I - oʻram toki (A).

Geometrik model — toroid parametrlari

Magnit yoʻl uzunligi:

$$l_m = 2\pi \cdot \frac{a + b}{2} = \pi(a + b)$$

Magnit kesim maydoni:

$$A_m = h \cdot (b - a)$$

Oʻram simi — geometriya va qarshilik

Sim kesim maydoni:

$$A_w = \frac{\pi d_w^2}{4}$$

(agar $d_w = 2 \text{ mm}$ boʻlsa: $A_w = \pi(1 \times 10^{-3})^2 = \pi \times 10^{-6} \text{ m}^2 \approx 3.1416 \times 10^{-6} \text{ m}^2$)

• Qarshilik (bir metr uchun):

$$R_{\text{per m}} = \frac{\rho}{A_w}$$

(raqamli misol: $\rho = 1.724 \times 10^{-8}$ va $A_w = 3.14 \times 10^{-6}$ $m^2 = R_{\text{per m}} = 0.0054877 \Omega/m$)

Oʻramning umumiy uzunligi (soddalashtirish, har bir oʻramning oʻrtacha uzunligi $l_{\text{turn}} = 2\pi r_m$):

$$l_{\text{total}} = N \cdot 2\pi r_m$$

va

$$R = R_{\text{per m}} \cdot l_{\text{total}}$$

Induktivlik va magnit zanjir (magnetic circuit)

Magnit qarshilik (toroid va, agar mavjud boʻlsa, havo yoriqlari bilan):

$$\mathcal{R} = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m} + \sum \frac{l_{g_i}}{\mu_0 A_{g_i}}$$

(agar hech qanday bo'shliq/gap bo'lmasa va faqat yadro bor bo'lsa, ikkinchi qo'shuv yo'q).

Induktivlik (ideal magnit doiraga yaqinlashuv):

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = \frac{N^2 \mu_0 \mu_r A_m}{l_m}.$$

Magnit oqim:

$$\Phi = \frac{NI}{\mathcal{R}}.$$

Kuch (force) modeli

Ikki mashhur yondashuv:

A) *Energiya differentsiallashtirish usuli* (eng umumiy). O'ram ichidagi magnit energiya:

$$W = \frac{1}{2} L(x) I^2.$$

Agar o'ram pozitsiyasiga bog'liq parametr x bo'lsa (masalan, o'ram va yadro orasidagi masofa o'zgarsa), kuch:

$$F(x) = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx}.$$

Shuning uchun dL/dx ni geometriyadan hosil qilish zarur. Agar $L = \frac{N^2}{\mathcal{R}(x)}$, unda

$$\frac{dL}{dx} = -\frac{N^2}{\mathcal{R}^2} \frac{d\mathcal{R}}{dx}.$$

B) *Maxwell stress yoki yopiq maydon uchun*:

Agar magnit maydon B va gap kesim maydoni A_{gap} ma'lum bo'lsa:

$$F = \frac{B^2 A_{gap}}{2\mu_0}.$$

Bu formula, odatda, havo yoriqli (air-gap) kuchini baholash uchun ishlatiladi.

Tok zichligi va ruxsat etilgan tok

Tok zichligi:

$$J = \frac{I}{A_w} \text{ (A/m}^2\text{)}.$$

Amaliy birikmada A/mm² ko'rinishida: $J_{(A/mm^2)} = J/10^6$.

Uzoq muddatli va qisqa muddatli ish uchun qabul qilingan **standart diapazonlar** (umumiy muhandislik qoidalari, yadroviy sharoitga bog'liq):

Uzluksiz: $J \approx 2 \div 6 \text{ A/mm}^2$ (odatda 3–5 A/mm² keng tarqalgan).

Qisqa majburiy yuk bo'lsa: 6–12 A/mm² gacha. (Aniq norma va ruxsat etilgan qiymatlar yadroning sovutish sharti, izolatsiya sinfi va talab qilingan harorat ko'tarilishi bilan belgilanadi — loyihaga mos ravishda tekshirish tavsiya etiladi.)

Issiqlik va quvvat yo'qotishlari

Joule yo'qotishi:

$$P_{\text{loss}} = I^2 R.$$

Agar R va I ma'lum bo'lsa, issiqlikni tarqatish uchun sovutish va temperaturani baholash kerak. Temperatura ko'tarilishi uchun vaqtga bog'liq model: lumped-parameter:

$$C \frac{dT}{dt} = P_{\text{loss}} - \frac{T - T_{\text{amb}}}{R_{\theta}}$$

bu yerda C — termal sig'im, R_{θ} — termo-rezistans (°C/W), T_{amb} — atrof muhit harorati.

Amaliy misol (raqamli hisob-kitoblar)

$$d_w = 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Sim kesim maydoni:

$$A_w = \frac{\pi d_w^2}{4} = \pi (1 \times 10^{-3})^2 \approx 3.14159265 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Mis zichligi $\rho = 1.724 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}^2$

bo'lsa:

$$R_{\text{per m}} = \frac{\rho}{A_w} \approx \frac{1.724 \times 10^{-8}}{3.14159265 \times 10^{-6}} \approx 0.00548766 \Omega.$$

Agar o'rtacha radius $r_m = 15 \text{ mm} = 0.015 \text{ m}$ va $N = 100$ marta bo'lsa:

Bitta turn uzunligi $l_{\text{turn}} = 2\pi r_m \approx 0.09424778 \text{ m}$

Umumiy uzunlik $l_{\text{total}} = 100 \cdot 0.09424778 \approx 9.42478 \text{ m}$

Umumiy qarshilik $R \approx 0.00548766 \cdot 9.42478 \approx 0.05172 \Omega$

Tok $I = 10 \text{ A}$

bo'lsa:

$$\text{Tok zichligi: } J = \frac{I}{A_w} \approx \frac{10}{3.1416 \times 10^{-6}} \approx 3.183 \times \frac{10^6}{\text{m}^2} = 3.183$$

Joule yo'qotishi:

$$P = I^2 R = 100 \cdot 0.05172 \approx 5.172 \text{ W}$$

Kuch uchun misol yondashuvi

Agar bizning magnit qarshilik (yadro) \mathcal{R} va uning x ga bog'liqligini aniqlay olsak, kuchni:

$$F(x) = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx} = \frac{1}{2} I^2 \cdot \left(-\frac{N^2}{\mathcal{R}^2} \frac{d\mathcal{R}}{dx} \right)$$

ko'rinishida yozish mumkin. Masalan, agar tortishish gapi $g(x)$ dagi kichik o'zgarish kuzatilsa va $\mathcal{R} \approx \frac{g(x)}{\mu_0 A_{\text{gap}}}$ tarzida bo'lsa, $\frac{d\mathcal{R}}{dx}$ ni aniq ifoda orqali topib, kuchni hisoblash mumkin. (Bu yondashuv havo yoriq mavjud bo'lgan holatlar uchun qulay.)

YAKUNIY XULOSALAR

Ushbu maqolada toroid o'zakli yuritmaga ega chiziqli dvigatel o'ramlarining elektr va elektromagnit parametrlarini optimal tanlash masalasi kompleks ravishda o'rganildi. Sim diametri, kesim maydoni, tok zichligi va tok ko'tarish qobiliyati dvigatelning issiqlik rejimi, elektromagnit induktivligi va kuch hosil bo'lishiga qanday ta'sir qilishi matematik va geometrik modellash orqali asoslab berildi. Simning 2 mm diametrli mis o'tkazgich uchun qarshilik, tok zichligi va issiqlik yo'qotishlari hisoblab chiqildi hamda amaldagi standart jadvallar bilan taqqoslandi. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, o'ramning optimal parametrlari dvigatelning barqaror ishlashi, issiqlikning me'yoriy tarqalishi va maksimal elektromagnit kuch hosil qilinishida hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi. Shuningdek, magnit zanjirning geometriyasi va yadro materialining magnit o'tkazuvchanligi L-induktivlikka sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlanib, bu esa dvigatelning dinamik samaradorligini oshirishga imkon beradi. Natijalar shuni tasdiqlaydiki, toroid o'zakli yuritmalar uchun o'ram simining to'g'ri tanlanishi mexatronik tizimlarda yuqori aniqlik, tejamkorlik va uzluksiz ishlashni ta'minlaydi. Taklif etilgan matematik model va hisoblash metodikasi chiziqli dvigatellarni loyihalashda qo'llash mumkin bo'lgan ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi. Ushbu metodika yordamida konstruktor va tadqiqotchilar maksimal elektromagnit samaradorlikka ega bo'lgan o'ram parametrlarini aniqlashda aniq mezonlarga tayanishlari mumkin. Mazkur ish kelgusida toroid o'zakli yuritmalar uchun issiqlik oqimlari, materiallarning nurlanishga chidamliligi, hamda yuqori chastotali rejimlarda skin-effekt ta'sirini chuqurroq o'rganish uchun bazaviy platforma yaratib beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. 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.
2. Abdullayev M.M., Abdiyev R.E. Dynamic characteristics of magnetoelectric linear actuators of control systems // Chemical Technology. Control and management, 04.05.2024y. №2 ISSN 1815-4840, (116) pp. 26-33.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Abdullayev M.M., Abdiyev R.E. Magnetoelectric 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).
7. Abdullayev M.M., Abdiyev R.E. Magnetoelectric 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).