UOT 621.317

BƏRK MAQNİT MATERİALLI İÇLİKLİ SOLENOİDİN ELEKTROMAQNİT DARTI QÜVVƏSİNİN TƏYİNİ

A.T. ALLAHVERDİYEVA*

Məqalədə bərk maqnit materiallı içlikli solenoidin elektromaqnit dartı qüvvəsinin təyinindən bəhs edilir. Maqnit levitasiyası prinsipindən istifadə edən cihazların işlənməsi və layihə edilməsi zamanı maqnit içliyin və solenoidin yaratdıqları maqnit sahələrin qarşılıqlı təsir qüvvələrinin təyini, tədqiq edilməsi böyük maraq doğurur. Aparılmış tədqiqatlara əsasən müəyyənləşdirilmişdir ki, maqnit içliklə solenoidin qarşılıqlı təsir qüvvəsinin təyini üçün təklif edilmiş metodikası kifayət qədər dəqiqliklə MLS parametrlərini hesablamağa imkan verir ki, maqnit levitasiyası prinsipində cihazların planlaşdırılmasıyla bağlı tədqiqat və eksperimental dizayn işlərin icra edilməsi vaxtı lazımdır.

Açar sözlər: *maqnit levitasiyası, bərk maqnit materiallı içlikli solenoid, maqnit sahəsi, elektromaqnit dartı qüvvəsi.*

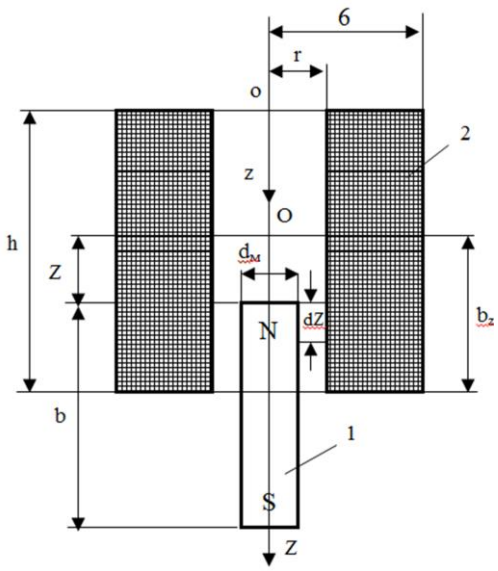
Giriş. Maqnit levitasiyası prinsipindən istifadə edən cihazların işlənməsi və layihə edilməsi zamanı maqnit içliyin və solenoidin yaratdıqları maqnit sahələrin qarşılıqlı təsir qüvvələrinin təyini, tədqiq edilməsi böyük maraq doğurur.

Çoxqatlı solenoiddən ibarət olan və silindrik maqnit içliyin azad levitasiya etməsi vəziyyətində olan cihazın qüvvə hissəsinin dartı xarakteristikalarının araşdırma məqsədi ondan ibarətdir ki, sistemin parametrlərinin elə nisbətlərini tapmaq lazımdır ki, MLS ən kiçik enerji xərcləri vaxtı işinin ən böyük sabitliyini təmin edilsin. Bu məqsədlə solenoidin (hündürlüyü, xarici və daxili radiusları, dolağın məftilinin diametri) həndəsi parametrlərinin təsirini müəyyən etmək tələb olunur, və levitasiya edən maqnit içliyin (uzunluğu, diametr, çəkisi və içliyin maqnit xüsusiyyətləri) və asılmış Z - şaquli koordinatı ilə $F_э$ qarşılıqlı təsir qüvvəsi arasındakı asılılığın tədqiq edilməsi məsələlərinə baxılmalıdır [4]. Bu cihazın elektromaqnit sisteminin dartı xarakteristikalarının solenoidin, maqnit içliyin konstruktiv, elektrik və maqnit parametrlərindən və içliyin asılma nöqtəsindən asılılığı müəyyən etməyə imkan yaradır [2].

Hesablama əsasına qoyulmuş tipik sxem şəkildə təqdim edilmişdir (şək. 1).

Maqnit asqısının qüvvə xarakteristikaları onunla koaksial silindrik sabit maqnitin vəziyyətindən solenoidin dartma qüvvəsinin asılılığını ifadə edir. Bu halda solenoid haqqında içliyin vəziyyətini xarakterizə edən Z koordinatını adətən koordinatların başlanğıcı kimi maqnit içliyin [1] yuxarı qırağının solenoidin oxunun mərkəzinə qədər olan məsafə müəyyən edirlər.

* Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası



Şək. 1. Solenoidin qüvvə xarakteristikalarını təyin edən tipik hesablama sxemi

Aparılmış tədqiqatlara uyğun olaraq maqnit içliklə solenoidin qarşılıqlı təsirinin elementar qüvvə $dF_э$ bərabərdir:

$$dF_э = -dP_m \cdot \frac{dB_Z}{dZ}, \qquad (1)$$

Burada B_z - solenoidin oxu üzrə yaranan maqnit induksiyası, Tl; dP_m- maqnitin elementar maqnit momenti, A·м^2.

$$dP_m = S \cdot di_м = S \cdot j_Z \cdot dZ \qquad (2)$$

burada *S* - maqnitin səthi molekulyar cərəyanının $I_м$ sahəsinin konturu (maqnit içliyin en kəsik sahəsi), м^2; dI_M - maqnitin silindrik səthindəki dZ kəsiyindəki hündürlüyün elementar molekulyar cərəyan, A; j_z- maqnitin səthi molekulyar cərəyanı, A/м.

(2) və (1) nəzərə alsaq:

$$dF_э = -S \cdot j_Z \cdot dB_Z \qquad (3)$$

(3) ifadəsini maqnit içliyin bütün b uzunluğu boyu dairəvi konturun molekulyar cərəyanı $I_м$ intiqrallasaq, alarıq:

$$\int_0^{F_Z} dF_Z = -S \cdot j_Z \int_Z^{Z+b} dB_Z,$$

buradan $F_Z = S \cdot j_Z \cdot (B_Z - B_{Z+b})$.

Məlum formula $B_Z = \mu_0 \cdot H_Z$, istifadə etsək alarıq:

$$F_Z = S \cdot j_Z \cdot \mu_0 \cdot (H_Z - H_{Z+b}). \qquad (4)$$

burada H_Z и H_{Z+b} - solenoidin yuxarı və aşağı hissəsində yerləşən sabit maqnitin içliyin tutduğu vəziyyətdəki sahə gərginliyidir, A/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Hs/м – havanın maqnit nüfuzluğudur.

Güman edərək ki, onun oxuna yaxın solenoidin H_z sahə gərginliyi radiallığının eyni olmaması onun oxunun yaxınlığında əhəmiyyətsizdir, çoxqatlı solenoidin [3] maqnit sahəsinin gərginliyinin düsturundan istifadə etsək alarıq:

$$H_Z = \frac{1}{2} \cdot W_0 \cdot W_0^{/} \cdot I_c \cdot \left[(Z + b_Z) \cdot \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + (Z + b_Z)^2}}{r + \sqrt{r^2 + (Z + b_Z)^2}} - \right.$$

$$\left. - (Z - b_Z) \cdot \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + (Z - b_Z)^2}}{r + \sqrt{r^2 + (Z - b_Z)^2}} \right] \qquad (5)$$

Burada H_z - solenoidin oxu üzərində Z nöqtəsindəki maqnit sahəsinin gərginliyidir, A/м; Z - maqnit içliyin yuxarı ucundan solenoidin mərkəzinə qədər olan məsafədir, м; b_z - sarğının kənarından solenoidin mərkəzinə qədər olan məsafə, м.

$$b_Z = 0.5h \qquad (6)$$

h – solenoid dolağının hündürlüyü, м; I_5 - solenoidin cərəyanı, A; W_0- solenoidin bir qatındakı sarğılar sayının vahid uzunluqdakı miqdarı, м$^{-1}$; W_0' - solenoidin vahid qalınlıqdaki sarğılar sayı, м$^{-1}$.

$$W_0 = W_0' = \frac{1}{d_п} \qquad (7)$$

R və r – dolağın xarici və daxili radiusu, м; $d_п$ - dolağa sarınan naqilin diametri, м.

(6) və (7)-ni (5) də yerinə yazsaq və nisbi qiymətlərə keçsək, alarıq:

$$H_Z = \frac{1}{2}\cdot\frac{I_c\cdot h}{d_п^2}\cdot\left[(\bar{Z}+0.5)\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{Z}+0.5)^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{Z}+0.5)^2}}-(\bar{Z}-0.5)\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{Z}-0.5)^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{Z}-0.5)^2}}\right]$$

burada $\bar{Z} = Z/h$ - içliyin asılma nöqtəsinin nisbi koordinatı; $\bar{R} = R/h$; $\bar{r} = r/h$ - solenoidin dolağının nisbi xarici və daxili radiusları.

(8) ifadəsini (4) də yazsaq, alarıq: (8)

$$F_Z = \frac{I_c\cdot h}{2\cdot d_п^2}\cdot\mu_0\cdot j_Z\cdot S\cdot K \tag{9}$$

Burada,

$$K = (\bar{Z}+0.5)\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{Z}+0.5)^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{Z}+0.5)^2}}-(\bar{Z}-0.5)\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{Z}-0.5)^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{Z}-0.5)^2}}-$$

$$-(\bar{Z}+0.5+\bar{b})\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{Z}+0.5+\bar{b})^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{Z}+0.5+\bar{b})^2}}+(\bar{Z}-0.5+\bar{b})\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{Z}-0.5+\bar{b})^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{Z}-0.5+\bar{b})^2}} \tag{10}$$

$\bar{b} = b/h$ - maqnit içliyin nicbi uzunluğu.

(9) və (10) ifadələrindən göründüyü kimi qüvvə xarakteristikalarının formaları K, əmsalından asılıdır və solenoidin və maqnit içliyin qeometrik parametrlərindən ($\bar{R}$, $\bar{r}$, $\bar{b}$) və Z koordinatından asılıdır. Qalan kəmiyyətlər (μ_0, j_Z, S; h; $d_п$, I_c) miqyas hasili rolunu oynayır və xarakteristikanın formasına təsir etmir.

(10) ifadəsi Z oxunun başlanğıc koordinatı solenoidin oxunun ortasına uyğun gəlir. Lakin maqnitin yuxarı hissəsi solenoidin mərkəzindən yuxarıda yerləşərsə, bu ifadədən istifadə etdikdə Z kordinatı mənfi olur ki, hesablamaların nəticələrinin analizini mürəkkəbləşdirir [3]. Ona görə koordinat başlanğıcını solenoidin dolağının yuxarı kənarında yerləşən müstəviə keçirmək lazımdır. $\bar{Z} = \bar{z} - 0.5$ (10) - da yerinə yazsaq harada ki, z və $\bar{z} = z/h$- uyğun olaraq mütləq və nisbi koordinatıdır, maqnit içliyin yuxarı kənarının asılma nöqtəsi solenoidin dolağının yuxarı kənar hissəsi.

Nəticədə alarıq:

$$K(\bar{z}) = \bar{z}\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+\bar{z}^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+\bar{z}^2}}-(\bar{z}-1)\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{z}-1)^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{z}-1)^2}}-$$

$$-(\bar{z}+\bar{b})\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{z}+\bar{b})^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{z}+\bar{b})^2}}+(\bar{z}-1+\bar{b})\cdot\ln\frac{\bar{R}+\sqrt{\bar{R}^2+(\bar{z}-1+\bar{b})^2}}{\bar{r}+\sqrt{\bar{r}^2+(\bar{z}-1+\bar{b})^2}} \tag{11}$$

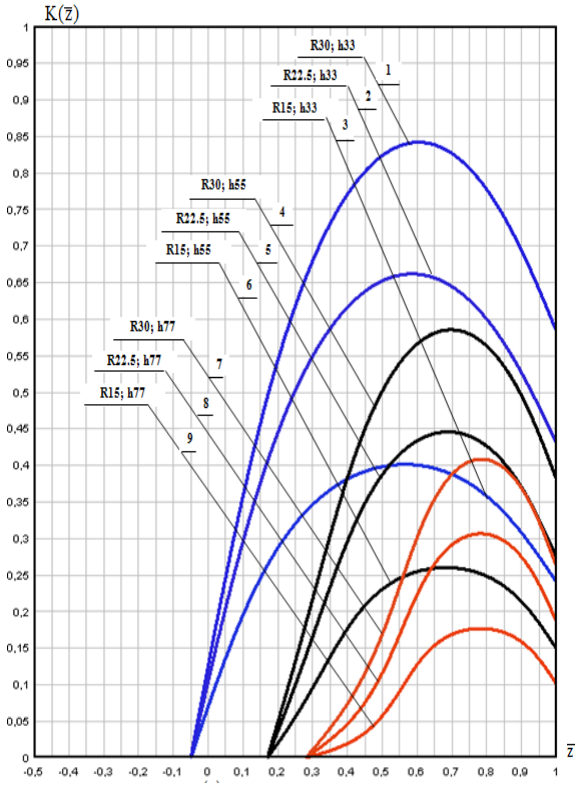
Nəzərə alsaq ki, $S = \frac{\pi\cdot d_м^2}{4}$, $\mu_0\cdot j_Z = B_м$, və (11) ifadəsini (9) da yerinə yazsaq, solenoidin dartı qüvvəsinin ifadəsini alarıq:

$$F_э = \frac{\pi\cdot d_м^2}{8\cdot d_п^2}\cdot B_м\cdot h\cdot K(\bar{z})\cdot I_c = K_0\cdot I_c\,. \tag{12}$$

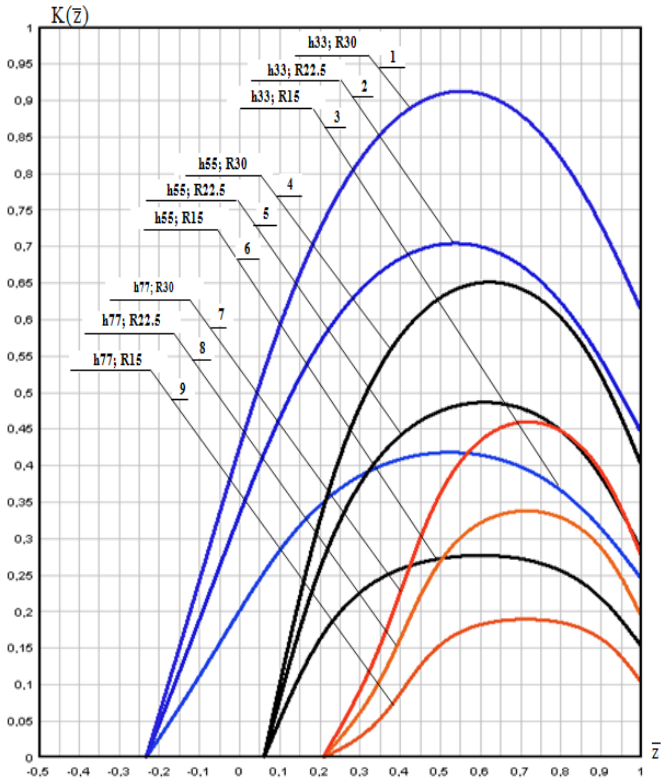
burada $d_м$ - maqnit içliyin diametri, м; $B_м$ - maqnit nüvəsinin materialının oxundakı maqnit induksiyası, Tl; $K(\bar{z})$ - solenoidin maqnit içliklə qarşılıqlı əlaqə qüvvəsinin əmsalı $\bar{z}$ oxu koordinatının funksiyası kimi; K_0 – solenoidin dartı qüvvəsi əmsalı, H/A. burada

$$K_0 = \frac{\pi\cdot d_м^2}{8\cdot d_п^2}\cdot B_м\cdot h\cdot K(\bar{z})\,. \tag{13}$$

Şəkil 2 və 3-də $K(\bar{z})$ asılılığının hesablama əsasında alınmış qrafikləri göstərilmişdir. Qrafikdən göründüyü kimi K(z) əmsalı ekstremal funksiyadır.



Şək.2. Solenoidin $K(z)$ dartı qüvvəsi əmsalının qrafikləri. b = 44mm olduqda h = 33, 55, 77mm; R = 30, 22.5, 15 mm; r = 7mm = const



Şək.3 Solenoidin $K(z)$ dartı qüvvəsi əmsalının qrafikləri. b = 55 mm olduqda h = 33, 55, 77mm; R = 30, 22.5, 15 mm; r = 7mm = const

Yuxarıda göstərilən asılılıqların qrafikləri ekstremal xarakter daşıyır, solenoid və maqnit içliyin konstruktiv parametrlərinin dartma qüvvəsinin nisbi və mütləq əmsallarının maksimum qiymətinə, həmçinin levitasiya olunmuş maqnit içliyin nisbi və mütləq koordinat nöqtələrinin mövqeyinə təsirinin tədqiqatının aparılmasına mübahisəsiz maraq yaradır, bu da solenoidin maksimal dartı qüvvəsi halına uyğundur [4]. Bu tədqiqatların nəticələri ilk növbədə energetik xərclər baxımından maqnit levitasiya sistem parametrləri haqqında optimal məlumat almağa, ikincisi isə onun enerji blokunun şaquli konstruktiv ölçülərini müəyyən etməyə imkan verir.

Nəticə. Beləliklə, maqnit içliklə solenoidin qarşılıqlı təsir qüvvəsinin təyini üçün təklif edilmiş metodikası kifayət qədər dəqiqliklə MLS parametrlərini hesablamağa imkan verir ki, maqnit levitasiyası prinsipində cihazların planlaşdırılmasıyla bağlı tədqiqat və eksperimental dizayn işlərin icra edilməsi vaxtı lazımdır.

Qüvvə xarakteristikalarının hesablamasının nəticələrinə görə minimal enerji xərcləri vaxtı levitasiyanın cərəyanının ən böyük sabitliylə levitasiya vəziyyətini təmin edən maqnitin asılmış vəziyyətinin optimal nöqtəsini müəyyən etmək olar. Bu böyük həssaslıqla və yüksək dəqiqliklə maddələrin, materialların və məmulatların müxtəlif parametrlərinin nəzarət cihazlarını yaratmağa imkan verir.

REFERENCES

1. **Pashaev A.M., Efendiev O.Z.** Teoriya i praktika magnitnoj levitacii v priborostroenii. – M.: Mashinostroenie, 2009. - 335 s.
   Пашаев А.М., Эфендиев О.З. Теория и практика магнитной левитации в приборостроении. – М.: Машиностроение, 2009. - 335 с.
2. **Pashaev A.M., Efendiev O.Z., Shahmatov I.E., Azizov R.R.** Opredelenie dinamicheskih pokazatelej kachestva sistemy magnitnoj levitacii. Kontrol. Diagnostika. 2004, №11.
   Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Шахматов И.Е., Азизов Р.Р. Определение динамических показателей качества системы магнитной левитации. Контроль. Диагностика. 2004, №11.
3. **Kozhevnikov V.J.** K58. Raschet elektromagnitov postojannogo toka: uchebn. posobie. Saratov: Sarat. gos. tehn. un-t, 2006. 40s.
   Кожевников В.Ю. К58. Расчет электромагнитов постоянного тока: учебн. пособие. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 40с.
4. **Əfəndiyev O.Z., Allahverdiyeva A.T.** Yumşaq maqnit materiallı nüvənin elektromaqnit sistemində levitasiya etməsinin bəzi nəzəri məsələləri // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi əsərləri, «Tİ-MEDİA» şirkətinin mətbəəsi, Bakı, 2015, №2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ТВЕРДОГО МАГНИТНОГО СОЛЕНОИДА

А.Т. АЛЛАХВЕРДИЕВА

В статье посвящена электромагнитному тяговому усилию твердого магнитного соленоида. Представляет большой интерес определение магнитного поля и сил взаимодействия магнитных полей, создаваемых соленоидом, при разработке и конструировании устройств с использованием принципа магнитной левитации. На основании полученных данных предложенная методика определения силы взаимодействия магнитов и соленоидов позволяет рассчитывать параметры MLS с достаточной точностью. Показана необходимость проводить экспериментальные исследования конструкции, связанные с планированием устройств по принципу магнитной левитации.

Ключевые слова: *магнитная левитация, твердый магнитный соленоид, магнитное поле, электромагнитное тяговое усилие.*

DETERMINATION OF ELECTROMAGNETIC DRIVE EFFORT OF A SOLID MAGNETIC SOLENOID

A.T. ALLAHVERDIYEVA

The article deals with the determination of the electromagnetic traction of a solid magnetic solenoid. The determination of the magnetic field and the forces of interaction of the magnetic fields are created by the solenoid in the design and construction of devices using the principle of magnetic levitation. Based on the data obtained, the proposed method for determining the strength of the interaction of magnets and solenoids makes it possible to calculate the MLS parameters with sufficient accuracy, so the time has come to conduct research and experimental studies of the design associated with planning devices using the magnetic levitation principle.

Keywords: *magnetic levitation, a solid magnetic solenoid, magnetic field, electromagnetic traction.*

Redaksiyaya daxil olub: *25.01. 2019*
Tamamlama işlərindən sonra: *12.10.2019*
Nəşrə qəbul edilib: *16.09.2019*