

КОСЕНКОВ ВОЛОДИМИР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7463-3028>e-mail: vladimirkosenkov@ukr.net**МАРТИНЮК ВАЛЕРІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5758-4244>e-mail: martynyuk.valeriy@gmail.com**ПОЛИЩУК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>e-mail: polishchuko@khmnu.edu.ua**ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5501-9038>e-mail: lisevichsv@gmail.com

ДО РОЗРАХУНКУ ЛІНІЙНОГО КРОКОВОГО ДВИГУНА З ПІДВИЩЕНИМ ТЯГОВИМ ЗУСИЛЛЯМ

Розглядається конструкція лінійного крокового електричного двигуна, у якого тягове зусилля визначається нормальною складовою магнітної індукції в робочому повітряному проміжку, та наведені основні співвідношення для розрахунку такого двигуна в циліндричному виконанні.

Лінійні крокові двигуни забезпечують точне керування і точне позиціонування широким спектром застосування. Їх властивість перетворювати електричну енергію в лінійне переміщення обумовлює їх застосування в роботах, автоматизації, медичному обладнанні, побутовій електроніці. На практиці знаходять застосування два принципово різних підходів для отримання лінійного переміщення.

Перший підхід: в одному корпусі розміщують кроковий двигун обертового типу та механічний перетворювач кутового переміщення в лінійне, наприклад, передача рейка-шестерня. Кроковий двигун при цьому має, як правило, багатофазну обмотку на статорі та постійний магніт на феромагнітному роторі (так званий активний варіант виконання).

Другий підхід: нерухома частина представляє феромагнітну основу з феромагнітними виступами, яка розміщена по всій довжині переміщення. А рухома частина містить на феромагнітних осердях обмотку керування та постійний магніт для фіксації положення при відключенні обмоток. Тобто, тут маємо безпосереднє перетворення енергії електромагнітного поля в лінійний рух. Саме цей варіант підлягає вдосконаленню.

Ключові слова: крокові двигуни, тягове зусилля, конструкція, розрахунки.

KOSENKOV VOLODYMYR**MARTYNYUK VALERIY****POLISHCHUK OLEH****LISEVYCH SVITLANA**

Khmelnyskyi National University

TO THE CALCULATION OF A LINEAR STEPPER MOTOR WITH INCREASED TRACTION FORCE

The design of a linear stepper electric motor is considered, in which the traction force is determined by the normal component of magnetic induction in the working air gap, and the main relations for calculating such a motor in a cylindrical design are given. The design of the motor provides a traction force almost an order of magnitude higher than that of classical stepper motors, where the principle of operation is based on the tangential component of the traction force in the air gap.

Linear stepper motors provide precise control and precise positioning for a wide range of applications. Their property of converting electrical energy into linear motion determines their use in robots, automation, medical equipment, and consumer electronics. In practice, two fundamentally different approaches to obtaining linear motion are used.

The first approach: a rotary-type stepper motor and a mechanical converter of angular motion into linear motion, for example, a rack-and-pinion transmission, are placed in one housing. The stepper motor has, as a rule, a multiphase winding on the stator and a permanent magnet on a ferromagnetic rotor (the so-called active version), although there may be a passive rotor: the stator windings can be powered unipolar or bipolar. In this case, control is distinguished by potential or pulse. With pulse control, as more economical in terms of power losses, after the pulse the winding is de-energized and the rotor is fixed by providing an internal reactive moment (if the rotor is active), or by special magnetic or other locking devices. The latter, in our opinion, is of interest for stepper motors when performing infrequent steps. The second approach: the stationary part is a ferromagnetic base with ferromagnetic protrusions, which is located along the entire length of the movement. And the moving part contains control windings on ferromagnetic cores and a permanent magnet for fixing the position when the windings are turned off. That is, here we have a direct conversion of electromagnetic field energy into linear motion. At the same time, in the linear version, the stepper motor can be two-coordinate when adding transverse magnetic field windings on the stator. Also, it is of interest to eliminate permanent magnets in the design of the stepper motor, which, at high traction forces, will not be able to ensure the fixation of the moving element when removing voltage from the stator windings. This option is subject to improvement.

Keywords: stepper motors, traction force, design, calculations.

Стаття надійшла до редакції / Received 05.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.05.2025

Вступ

Крокові електричні двигуни знаходять застосування у випадках, коли кожному імпульсу напруги, що передається на одну або декілька обмоток, відповідає визначений кут повороту рухомого елемента або визначений крок його лінійного переміщення. Конструктивне виконання (обертовий або лінійний варіант) обумовлює особливості розрахунків крокових двигунів.

Аналіз відомих рішень

В більшості класичних кокових двигунів як лінійного, так і обертового типів, наприклад [1,2,3], за принципом дії використовується тангенціальна складова тягового зусилля в повітряному проміжку. Ця складова на порядок нижче нормальної складової тягового зусилля підйомного електромагніту.

В Хмельницькому національному університеті розроблені конструкції лінійного крокового електромагнітного двигуна [4,5] з підвищеним тяговим зусиллям. На рис. 1 наведена конструктивна схема двигуна [5].

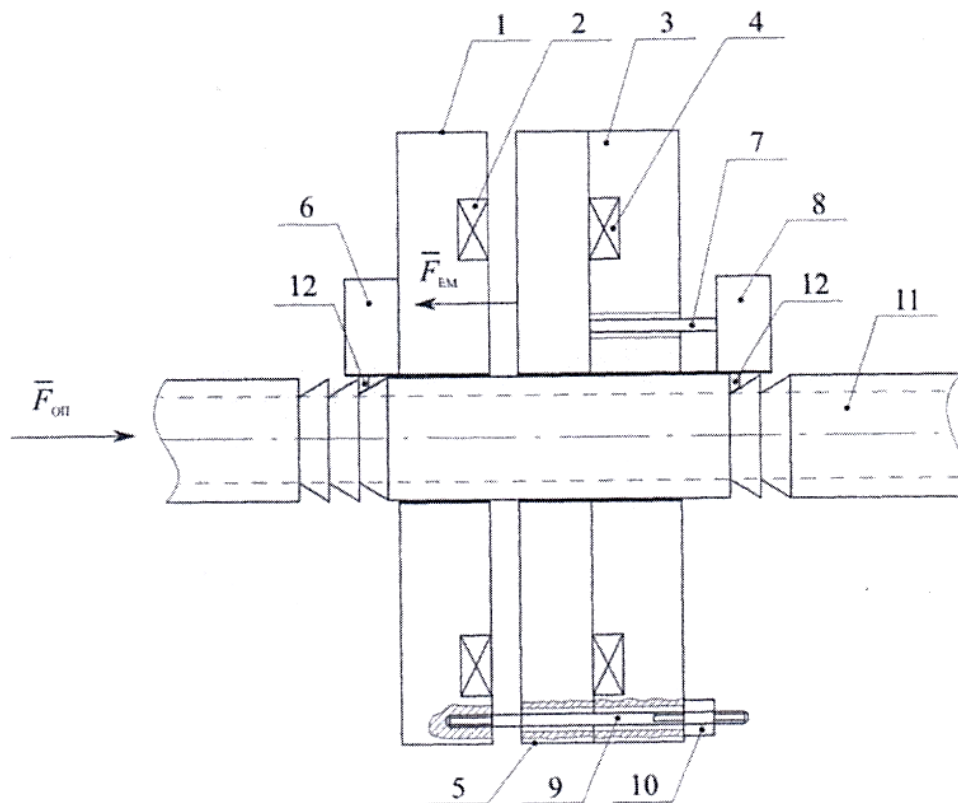


Рисунок 1. Конструкція лінійного крокового електромагнітного двигуна.

Активна частина двигуна включає тяговий електромагніт 1 з обмоткою 2, тяговий електромагніт 3 з обмоткою 4, якорь 5 та електромагніти-фіксатори 6 і 8. Фіксатор 6 жорстко зв'язаний з електромагнітом 1, а фіксатор 8 за допомогою штока 7 – з якорем 5. Кожен фіксатор включає свій магнітопровід, обмотку збудження, пружину, яка діє на рухомий стопор 12.

Електромагніти 1 та 3 з'єднані шпилькою 9, причому шпилька вкручена в тіло електромагніту 1, а електромагніт 3 має можливість пересуватись по шпильці 9 для регулювання сумарного повітряного проміжку зазору між тяговими електромагнітами та якорем 5.

Регулювання здійснюється гайкою, що розміщена в обоймі 10, яка жорстко з'єднана з електромагнітом 3 і на який нанесено лімб для встановлення необхідної величини зазору (кроку переміщення).

Рухомою частиною є напрямна-шток 11. Розмір паза пилоподібної форми в напрямку переміщення дорівнює кроку переміщення. Сумарний повітряний проміжок між електромагнітами 1, 3 та якорем 5 дорівнює кроку переміщення. Кут скосу паза напрямної-штоку і скошу стопорів 12 фіксаторів 6,8 однакові.

Двигун працює наступним чином. Його конструкція забезпечує тягове зусилля для переміщення штока вліво. Так, при подачі напруги на електромагніт 1 якорь 5 притягується до нього і своїм стопором 12 фіксатора 8 переміщує шток 11 вліво на величину кроку переміщення. При цьому стопор 12 фіксатора 6, стискуючи пружину, піднімається ковзанням під дією пилоподібного паза, а після здійснення кроку переміщення заходить в заглиблення під дією пружини в новий паз, здійснюючи фіксацію штока. На кресленні показані напрями сили опору $F_{оп}$ та електромагнітної сили $F_{ем}$.

Далі вмикається обмотка електромагніту 3 і якорь 5 притягується до нього. При цьому стопор 12 фіксатора 8 ковзає по похилій площині паза напрямної-штоку, стискуючи пружину, а по завершенню кроку переміщення стопор фіксатора 8 входить в зачеплення з новим пазом штока. Далі процес

повторюється. Тут головним є те, що під час руху або фіксації електромагніти фіксаторів 6, 8 знеструмлені. Обмотки фіксаторів 6, 9 включаються тоді, коли треба повернути шток в початкове положення. Тоді стопори виходять із зачеплення зі штоком, а він повертається в початкове положення, наприклад під дією ваги з тросом. Прикладом такого приводу може бути керування поворотом за допомогою передачі рейка-шестерня панелі сонячної батареї, коли електромагніти-фіксатори вмикаються один раз після заходу сонця для повернення батареї в початкове положення, наприклад за допомогою противаги.

Для можливості регулювання кроку переміщення застосовано напрямну-шток з іншим кроком пилкоподібних пазів та відповідним регулюванням відстані між тяговими електромагнітами.

Враховуючи механічний контакт між рухомою та нерухомою частинами двигуна, він призначений для роботи в режимах при нечастих включеннях, наприклад, в системі поворота сонячного трекера.

Постановка задачі

Враховуючи нове конструктивне рішення для лінійного крокового електромагнітного двигуна, є необхідність навести деякі рекомендації стосовно розрахунків такого двигуна.

Розв'язання поставленої задачі

В запропонованих конструкціях за принципом дії використовується сила тяжіння між рухомою та нерухомою частиною:

$$Q = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S_0, \quad (1)$$

де B_0 – магнітна індукція в повітряному проміжку; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; Гн/м, S_0 – сумарна площа повітряного проміжку.

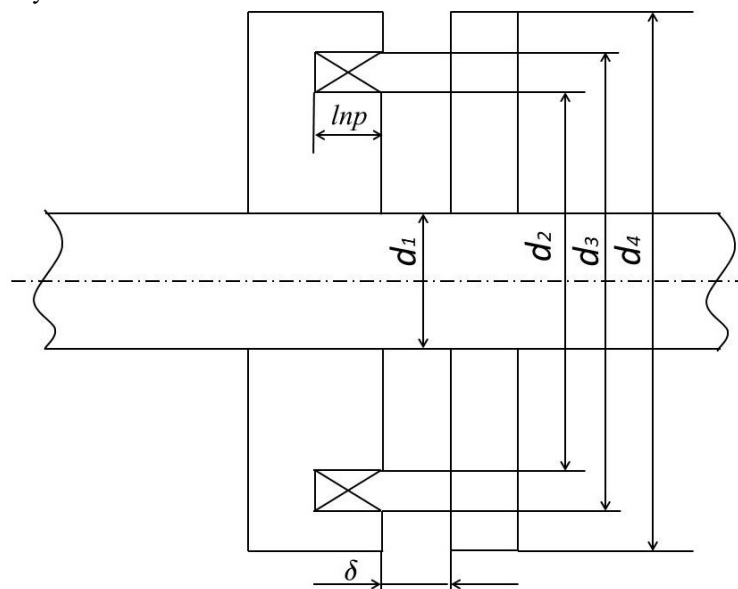


Рисунок 2. Модель конструкції лінійного крокового електромагнітного двигуна для розрахунків

При немагнітному штоці:

$$S_0 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) + \frac{\pi}{4} (d_4^2 - d_3^2) \quad (2)$$

Ця сила значно перевищує силу, яка в електричних машинах та апаратах визначається тангенціальною складовою.

На одиницю площі $Q^* = \frac{B_0^2}{2\mu_0}$.

Так при $B_0 = 1$ Тл $Q^* = \frac{1^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 4 \cdot 10^5$ Н/м.

Вже при невеликих розмірах: $d_1 = 2$ см; $d_2 = 6$ см; $d_3 = 10$ см; $d_4 = 11,5$ см та при $B_0 = 0,8$ Тл маємо зусилля $Q = 1,28 \cdot 10^3$ Н.

Для розрахунку крокового електромагнітного двигуна можна використати наступну послідовність:

1. Загадаємо необхідне тягове зусилля Q_H .
2. Зважаючи на те, що рух якоря починається після того, як електромагнітне зусилля Q_{em} перевищить зусилля опору Q_H , задаємо

$$Q_{em} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S_0 > Q_H \quad (3)$$

Далі задаємо B_0 і визначаємо S_0 , а після цього задаємо d_1, d_2, d_3, d_4 з урахуванням того, що при однаковій індукції в повітряному проміжку $\frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) = \frac{\pi}{4} (d_4^2 - d_3^2)$.

3. Необхідна магніторухійна сила обмотки:

$$F = I \cdot W = \frac{B_0 \cdot 2\delta}{\mu_0} \quad (4)$$

Якщо враховувати магнітний опір сталі, можна скористатися середнім значенням магнітної проникливості сталі і визначити приведену до повітряного проміжку довжину силової лінії в сталі $l_{\text{пр}}$ та додати її до 2δ .

Значення F визначає необхідну площу вікна під обмотку. Тобто при визначених розмірах d_2 та d_3 треба обрати розмір $l_{\text{в}}$. Слід врахувати, що коефіцієнт заповнення площі ізолюваними провідниками $K_s = 0,68 \dots 0,74$.

4. Далі можна обрати діаметр ізолюваного провoda і визначити кількість витків обмотки W .

5. До початку руху $\delta = \text{const}$, $L = \text{const}$ і струм змінюється за законом

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5)$$

$$\text{де } \tau = \frac{L}{R}.$$

З цього рівняння час рухання:

$$t_p = \tau \ln \frac{1}{1 - \frac{I_p R}{U}}, \quad (6)$$

де I_p – струм, при якому починається рух якоря.

Цей струм можна визначити з умови $Q_{\text{ем}} = Q_H$ або

$$\frac{B_0^2}{2\mu_0} S_0 = Q_H \rightarrow \frac{(I \cdot W \cdot \mu_0)^2 \cdot S_0}{(2\delta)^2 \cdot 2\mu_0} = Q_H \rightarrow I_p = \frac{2\delta}{W} \sqrt{\frac{2Q_H}{\mu_0 S_0}} \quad (7)$$

6. Знаючи кількість витків W , діаметр провoda та геометрію котушки, можна визначити активний опір та індуктивність обмотки, а, значить, і постійну часу τ .

7. У праці [6] в результаті аналізу отриманий вираз для часу пересування t_n якоря:

$$t_n = \sqrt{\frac{2m(\delta_0 + \delta_k)}{Q_H}} \quad (8)$$

де m – маса рухомої частини; δ_0 – початкова величина повітряного проміжку; δ_k – кінцева величина повітряного проміжку (технологічний зазор).

Тоді загальний час спрацювання електромагніту

$$t_{\text{срп}} = \tau \ln \frac{1}{1 - \frac{I_p R}{U}} + \sqrt{\frac{2m(\delta_0 + \delta_r)}{Q_H}} \quad (9)$$

8. Якщо при визначеному опорі R та струмі I_p напруга живлення перевищує допустиму, то треба обрати більший діаметр провoda $d_{\text{пр}}$, розрахувати кількість витків, опір обмотки, струм I_p та перевірити $U = I_p \cdot R$.

Наприклад, якщо збільшити $d_{\text{пр}}$ вдвічі, то кількість витків зменшиться у 4 рази (довжина провoda обмотки також зменшиться у 4 рази), а площа провoda збільшиться у 4 рази. Тому опір обмотки зменшиться в 16 разів, а струм I_p збільшиться в 4 рази. Тоді потрібна напруга зменшиться в 4 рази.

Енергія за один цикл роботи (за один крок):

1. Енергія за час t_p :

$$\begin{aligned} W_p &= \int_0^{t_p} i^2 R dt = R \int_0^{t_p} \left[\frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \right]^2 dt = \frac{U^2}{R} \int_0^{t_p} (1 - 2e^{-\frac{t}{\tau}} + e^{-\frac{2t}{\tau}}) dt = \\ &= \frac{U^2}{R} (t_p - 2(-\tau)(e^{-\frac{t_p}{\tau}} - 1) + (-\frac{\tau}{2})(e^{-\frac{2t_p}{\tau}} - 1)) = \\ &= \frac{U^2}{R} \left[t_p + 2\tau e^{-\frac{t_p}{\tau}} - 2\tau - \frac{\tau}{2} e^{-\frac{2t_p}{\tau}} + \frac{\tau}{2} \right] = \frac{U^2}{R} \left[t_p - 1,5\tau + 2\tau e^{-\frac{t_p}{\tau}} - 0,5\tau e^{-\frac{2t_p}{\tau}} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

2. Енергія за час пересування $t_{\text{п}}$ при умові, що $I = I_p = \text{const}$ (з урахуванням $t_{\text{п}} < t_p$):

$$W_{\text{п}} = I_p^2 R t_{\text{п}} \quad (11)$$

3. Енергія за один крок:

$$W_{\text{кр}} = W_p + W_{\text{п}} \quad (12)$$

При використанні крокового двигуна для повороту сонячної панелі, наприклад, через передачу рейка-шестерня, після кожного кроку обмотка знеструмлюється і енергія не витрачається.

Висновки

В роботі наведена конструкція лінійного крокового електромагнітного двигуна, у якого тягове зусилля визначається нормальною складовою зусилля в робочому повітряному проміжку, та дані рекомендації до розрахунку такого двигуна

Література

1. Третяк А. В. Основи робототехніки : навч. посібник для студентів спеціальностей 133 “Галузеве машинобудування”, 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, 174

“Комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка” / А. В. Третяк, А. М. Кльон. – Полтава : Вид-во нац. ун-ту «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка», 2024. – 135 с.

2. Електротехніка та основи електроніки : підручник для здобувачів професійної освіти / А. М. Гуржій, С. К. Мицантов, А. Т. Нельга, В. М. Співак. – Київ : Літера ЛТД, 2020. – 288 с.

3. Патент України № 2136. Електрична машина з поперечним магнітним потоком / заявник і власник патенту Інститут електродинаміки НАН України. – № 2136 ; заявл. 15.04.1992 ; опубл. 25.05.1993, Бюл. № 5.

4. Патент України № 128804. Електромагнітний привод / заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка». – № 128804 ; заявл. 12.02.2018 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19.

5. Патент України № 131952. Пристрій керування електромагнітами / заявник і власник патенту Харківський нац. університет радіоелектроніки. – № 131952 ; заявл. 10.08.2018 ; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 3.

6. Косенков В. Д. До визначення часу опрацювання електромагнітів крокового двигуна / В. Д. Косенков, Л. В. Скубій // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2002. – № 1. – С. 76–89.

References

1. Tretiak A. V. Osnovy robototekhniki : navch. posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 133 “Haluzeve mashynobuduvannia”, 141 “Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika”, 174 “Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii ta robototekhnika” / A. V. Tretiak, A. M. Klon. – Poltava : Vyd-vo nats. un-tu «Poltavska politekhnika im. Yurii Kondratiuka», 2024. – 135 s.

2. Elektrotekhnika ta osnovy elektroniky : pidruchnyk dlia zdobuvachiv profesiinoi osvity / A. M. Hurzhii, S. K. Mytsantov, A. T. Nelha, V. M. Spivak. – Kyiv : Litera LTD, 2020. – 288 s.

3. Patent Ukrainy № 2136. Elektrychna mashyna z poperechnym mahnitnym potokom / zaiavnyk i vlasnyk patentu Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy. – № 2136 ; zaiavl. 15.04.1992 ; opubl. 25.05.1993, Biul. № 5.

4. Patent Ukrainy № 128804. Elektromahnitnyi pryvod / zaiavnyk i vlasnyk patentu Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika». – № 128804 ; zaiavl. 12.02.2018 ; opubl. 10.10.2018, Biul. № 19.

5. Patent Ukrainy № 131952. Prystrii keruvannia elektromahnitamy / zaiavnyk i vlasnyk patentu Kharkivskyi nats. universytet radioelektroniky. – № 131952 ; zaiavl. 10.08.2018 ; opubl. 25.02.2019, Biul. № 3.

6. Kosenkov V. D. Do vyznachennia chasu opratsiuvannia elektromahnitiv krokovoho dvyhuna / V. D. Kosenkov, L. V. Skubii // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2002. – № 1. – S. 76–89.