

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-86>
УДК 621.313

КОСЕНКОВ ВОЛОДИМИР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3771-3771>e-mail: kosenkovvo@khmnu.edu.ua**ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5501-9038>e-mail: lisevychs@khmnu.edu.ua**ПОЛІЩУК АНДРІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>e-mail: polishchuka@khmnu.edu.ua**ПОЛІЩУК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>e-mail: polishchuko@khmnu.edu.ua**ОБМОТКИ ЯКОРІВ ЛІНІЙНИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Лінійний електричний двигун постійного струму у простішому випадку представляє розгортку на площині машини постійного струму обертового типу. В першому варіанті це якорь, як рухома частина, та індуктор з полюсами, як нерухома частина, довжина якого перевищує довжину якоря на величину переміщення. В другому варіанті якорь, як нерухома частина, має довжину більше довжини індуктора на величину переміщення. Комутація обмотки якоря може бути здійснена як електромеханічним, так і електронним комутатором. Недоліком обох варіантів є підвищені витрати міді на обмотки нерухомого елемента, які залежать від величини переміщення. Для усунення цього недоліку були розроблені лінійні двигуни постійного струму з суміщенням обмотки якоря та обмотки збудження на рухомому елементі, а нерухома частина представляє феромагнітну полюсоутворюючу систему, розміщену по всій довжині переміщення.

Розімкненість магнітопроводів обумовлює крайові ефекти та особливості виконання обмотки якоря. З точки зору виконання обмотки якоря нас цікавить варіант рухомого якоря. Отже, потрібно розглянути можливість застосування класичних обмоток барабанного якоря та кільцевих обмоток для якорів лінійних двигунів постійного струму та проаналізувати нові підходи для утворення обмоток.

Ключові слова: лінійний двигун постійного струму, якорь, індуктор, обмотки якорів.

KOSENKOV VOLODYMYR, LISEVYCH SVITLANA, POLISHCHUK ANDRII, POLISHCHUK OLEH

Khmelnitskyi National University

A linear DC electric motor in the simplest case represents a sweep on the plane of a rotating DC machine. In the first variant, this is an armature as a moving part and an inductor with poles as a fixed part, the length of which exceeds the length of the armature by the amount of displacement. In the second variant, the armature as a fixed part has a length greater than the length of the inductor by the amount of displacement. This variant was first manufactured in a cylindrical design. The armature winding can be switched by both an electromechanical and an electronic switch. For example, in a cylindrical design with a long armature, the brushes simply slid along the stripped armature winding. The disadvantage of both variants is the increased copper consumption for the windings of the fixed element, which depend on the amount of displacement.

To eliminate this drawback, linear DC motors were developed with a combination of the armature winding and the excitation winding on the moving element, and the fixed part represents a ferromagnetic pole-forming system located along the entire length of the displacement. At the same time, both a single-name pole excitation system and a different-name pole excitation system can be formed with respect to the armature. In a single-name pole excitation system, only half of the active sides of the armature winding sections are active. In the case of a different-pole system, it is possible to ensure full use of the armature winding, but the design of the magnetic system will be more complex.

The open magnetic core configuration leads to edge effects and specific features in the design of the armature winding. From the point of view of the armature winding, we are interested in the first variant of the sweep of a rotating-type DC machine and the variant with the combination of the armature winding and the excitation winding on the moving element. That is, we are considering a variant of a linear motor in which the armature is a moving element, and its length is less than the fixed part by the amount of displacement. Therefore, it is necessary to consider the possibility of using classical drum armature windings and ring windings for the armatures of linear DC motors and to analyze new approaches to the formation of windings.

Keywords: linear DC motor, armature, inductor, armature windings.

Стаття надійшла до редакції / Received 07.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Косенков Володимир, Світлана Лісевич, Поліщук Андрій, Поліщук Олег

Дослідження лінійних електричних машин в Україні

Науковці Київського політехнічного інституту (КПІ) спільно із заводом електротранспорту почали розробляти та досліджувати електропривід з лінійним двигуном з 1963 року. В 1966 році був створений вагон на шість пасажирів з приводом від лінійного асинхронного двигуна. В 1967 році була побудована монорейка, перша у світі, з лінійним двигуном на території ВДНГ. В 1973 році КПІ провів першу всесоюзну наукову конференцію по електроприводам з лінійними двигунами.

Лінійні двигуни постійного струму почали розробляти та досліджувати в Одеському СКБ спеціальних верстатів в 1965 році для приводів плоскошліфувальних верстатів. До цієї роботи підключилися науковці Одеського політехнічного інституту, якими були розроблені три нові обмотки якорів лінійних двигунів

постійного струму, захищені авторськими свідоцтвами. Було захищено ряд дисертацій.

У Хмельницькому національному університеті (на сьогодні) роботи в області розробки та дослідження лінійних двигунів постійного струму розпочалися з 1975 року. За цей час, розробки захищені десятками авторських свідоцтв та десятками патентів України. Продовжується співпраця з Одеським національним політехнічним університетом.

Постановка проблеми

У зв'язку з тим, що магнітопроводи лінійної машини розімкнені, доцільним буде проаналізувати можливість використання обмоток барабанного якоря машини обертового типу для рухомих якорів лінійних двигунів постійного струму, а також розглянути нові обмотки для цих якорів.

Основні результати роботи

На рис. 1 наведено розгортку на площині машини постійного струму з рухомим якорем. Тут 1 - це магнітопровід індуктора з полюсами, який розміщений по всій довжині переміщення.

На рис. 2 наведено один із варіантів лінійного двигуна постійного струму з суміщенням обмотки збудження 2 та обмотки якоря 3 на рухомому елементі 1. Нерухома частина представляє феромагнітні бруски 5, розміщені через полюсну поділку по всій довжині переміщення, які виконують роль полюсів. Це так званий варіант одноімменнополюсного двигуна. Є також варіанти різноімменнополюсних двигунів, наприклад [2].

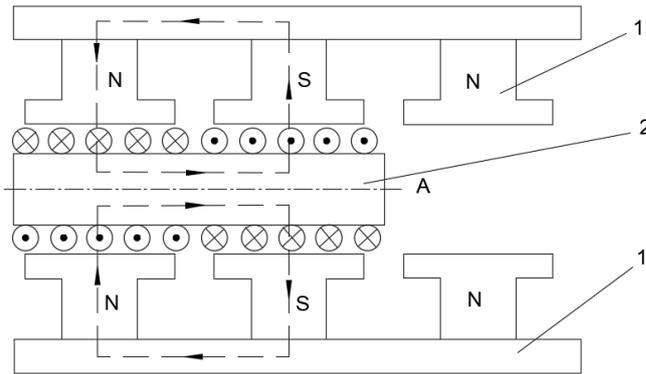


Рис. 1. Лінійний двигун з рухомим якорем

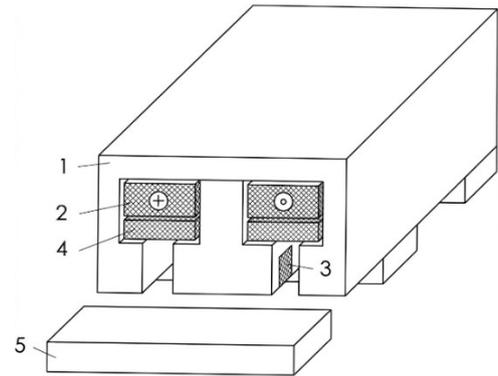


Рис. 2. Двигун зі суміщенням обмоток якоря та збудження на рухомому елементі

Якщо розглядати двошарову петльову обмотку чотириполюсного двигуна, то в лінійному виконанні половина секційних сторін крайніх полюсних поділок можуть бути зв'язані тільки за рахунок подовжених лобових частин, що показано на рис. 3 для довжини якоря $L_a = 4\tau$, $z = 12$.

При діаметральному кроці подовження складає:

$$\Delta l_x = 4(p-1)\tau, \quad (1)$$

де $p = L_a/2\tau$.

Порівняно з рівносекційною обмоткою перевитрата міді за результатами аналізу складає:

$$\Delta G_M = \frac{p-1}{p(\frac{1}{\lambda}+1,4)} 100\%, \quad (2)$$

де λ - відношення полюсної поділки τ до активної довжини провідника ($\lambda = \tau/l_\delta$).

Крім перевитрати міді, такі секції обумовлюють несиметрію обмотки.

Іншим варіантом замикання якорної обмотки є подовження якоря на одну полюсну поділку і виконання обмотки з напівзаповненими пазами на крайніх полюсних поділках (рис. 4). На рис. 4 наведено схему двошарової петльової обмотки при $L_a = 5\tau$, $z = 15$.

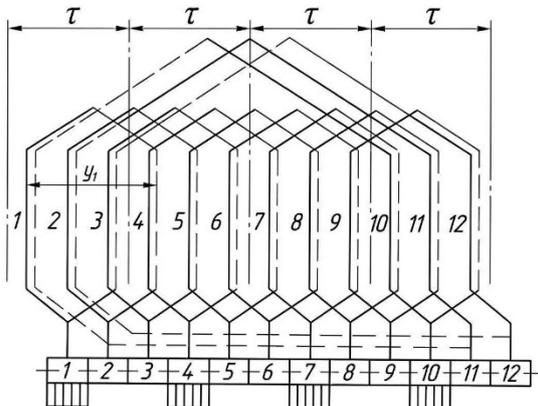


Рис. 3. Схема двошарової петльової обмотки звичайного виконання для плоского якоря $L_a = 4\tau$; $z = 12$

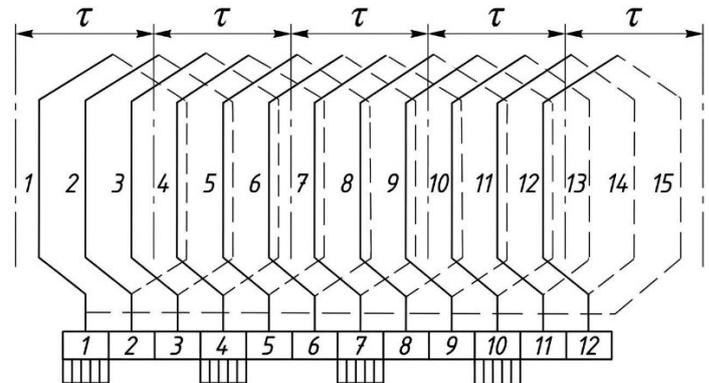


Рис. 4. Схема двошарової петльової обмотки з напів-заповненими пазами на краях якоря при $L_a = 5\tau$; $z = 15$

Однак цей варіант має і свої недоліки. Крім недовикористання сталі при непарному числі полюсних поділок в машині з поздовжнім магнітним потоком в ярмі якоря (рис. 1) виникає поздовжній крайовий ефект, який проявляється в пульсаціях основного магнітного потоку при русі, що викликає пульсації тягового зусилля.

З теорії лінійних асинхронних машин [3] відомо, що повне заповнення всіх пазів індуктора при парному числі полюсних поділок досягається укладкою в y_1 пазів з кожного краю додаткових секцій, неактивні сторони яких «звалені» на торець. (де y_1 - перший крок обмотки як число зубцевих поділок t_z).

Всі основні секції охоплюють однакову площу активної поверхні якоря $S_{осн} = l_\delta \cdot y_1 \cdot t_z$ і середні значення їх $E_{ср.осн}$ однакові. Додаткові секції мають різну площу охопту активної поверхні якоря, а значить мають різні середні значення ЕРС. Так, середні значення ЕРС секції, активна сторона якої розміщена в k -тому пазу від краю якоря, складає:

$$E_{ср.к} = E_{ср.осн} \frac{k-0,5}{y_1} \tag{3}$$

Для усунення цього недоліку слід з додаткових секцій утворювати здвоєні секції: якщо з одного краю якоря активна сторона додаткової секції розміщена в k -му пазу від краю якоря, то послідовно з нею з'єднується секція, активна сторона якої розміщена в $y - (k - 1)$ пазу від другого краю якоря.

Опір здвоєної секції при $l_\delta/\tau = 0,5 \dots 2$ в $1,25 \dots 1,6$ разів більше опору основної секції. З метою зменшення несиметрії паралельних віток обмотки по опорам слід провести рівномірний розподіл додаткових секцій по них. Розподіл здійснюється шляхом заміни місцями основної та додаткової здвоєної секції.

Розглянутий варіант з додатковими секціями має основний недолік - це те, що всі додаткові секції мають різну конфігурацію. Враховуючи недоліки розглянутих варіантів вчені Одеського політехнічного інституту розробили три типи обмоток для лінійних двигунів постійного струму [4, 5, 6]. Спільним для цих обмоток є те, що укладання секцій виконується групами, кожна з яких розміщена на подвійній полюсній ділянці і не перетинається з секціями другої групи. Кожна така група секцій одношарової обмотки містить y_1 , а в двошаровій - $2y_1$ секцій. При цьому розміри всіх секцій однієї обмотки однакові. На рис. 5 наведено схему одношарової петльової обмотки при $L_a = 4\tau$; $z = 12$. Обмотка виконується симетричною відносно геометричної нейтралі, яка проходить між сусідніми звітними поділками 2τ . При цьому, з однієї сторони цієї нейтралі розміщена рівносекційна правоходова частина обмотки з правим обходом, а з другої сторони - також рівносекційна частина, але з лівим обходом. Це дозволяє отримати замкнений полігон ЕРС секцій. На наступних чотирьох поділках обмотка повторюється. Обмотку можна замкнути на кожних 4τ та зробити якір роз'ємним, але тоді потрібні вирівнювачі першого та другого роду.

Умови виконання обмотки: p - парне число; $z/2p$ - ціле число; $y_1 = \tau$.

Для двошарової петльової обмотки: p - ціле число; $z/2p$ - ціле число; $y_1 = \tau$.

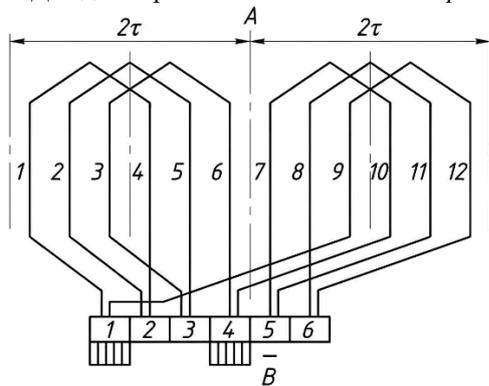


Рис. 5. Схема одношарової петльової обмотки лінійного двигуна, $L_a = 4\tau$; $z = 12$

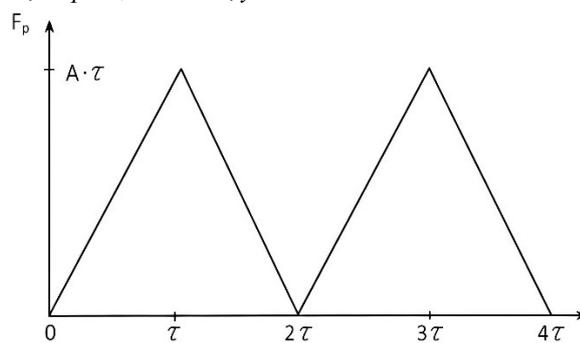


Рис. 6. Крива розподілу МРС лобових частин для одного положення обмотки за рис. 5

При використанні обмоток [4, 5, 6] слід враховувати конфігурацію магнітної системи. Так, у випадку комірки рис. 2, коли лобові частини обмотки охоплені магнітопроводом, в робочому повітряному проміжку з'являється МРС лобових частин. На рис. 6 наведено графік МРС лобових частин по довжині якоря для положення секцій згідно рис. 5. Бачимо, що найбільше значення МРС складає $A \cdot \tau$ (A - лінійне струмове навантаження), в той час, як поле поперечної реакції якоря має максимальне значення $A \cdot \tau / 2$. При цьому МРС лобових частин діє по тому ж шляху, що і МРС обмотки збудження. При зміні положення щіток МРС лобових частин зменшується і, таким чином, маємо пульсуючу дію.

Отже, для такої конфігурації магнітної системи використання обмоток [4, 5, 6] недоцільно. Для конфігурації згідно рис. 1 ці обмотки будуть найкращими.

Також, для якорів двигунів з двостороннім індуктором (рис. 1) слід розглянути можливість використання обмоток з кільцевими секціями, які намотують в протилежні пази двостороннього якоря. Цей варіант підходить для двигунів з поздовжнім потоком в ярмі якоря, як показано на рис. 1, де навпроти один одного полюси однієї полярності. При цьому, як і у випадку шаблонних секцій крайніх полюсних поділок, одні сторони яких «звалені» на торець, тут також середні значення ЕРС секцій залежать від положення секції від краю якоря. Тому потрібно усунути цей недолік, а саме: кожні дві секції, які розміщені на відстані полюсної

поділки, з'єднують зустрічно, а до комутатора під'єднуються здвоєні секції, в кожній з яких і максимальні і середні значення ЕРС однакові.

Для двигунів з двостороннім індуктором та здвоєним якорем можливо застосування спільних шаблонних секцій для таких якорів, як показано на рис. 7. Кожна така секція утворена з двох звичайних шаблонних секцій шляхом заміни однієї лобової частини переходом з однієї сторони якоря на іншу [7]. При цьому зберігається перевага шаблонної обмотки перед обмоткою кільцевого типу в плані технологічності. Можна довести, що при цьому досягається економія міді порівняно із роздільними шаблонними обмотками:

$$\Delta G_M = \frac{0,4\lambda}{1+1,4\lambda} 100\%, \quad (4)$$

Так, при $\lambda = 0,5$ економія $\Delta G_M = 11,8\%$, а при $\lambda = 1,0$ економія $\Delta G_M = 16,7\%$. Відмітимо, що порівняно з двома роздільними шаблонними обмотками кільцева обмотка дає таку економію міді: при $\lambda = 0,5$ - 23,6%; при $\lambda = 1$ - 33,4%.

На завершення, розглянемо обмотку якоря двигуна з двостороннім індуктором (рис. 1), у якого протилежні полюси мають різну полярність, і в ярмі якоря існує поперечний магнітний потік. В цьому випадку для двох сторін якоря можна запропонувати дві роздільні рівносекційні шаблонні обмотки або обмотку з шаблонними секціями, спільними для двох сторін якоря, і у яких активні сторони зміщені на полюсну поділку [8]. Якір з такою обмоткою наведено на рис. 8. Бачимо, що тут необхідні шаблонні секції двох типорозмірів.

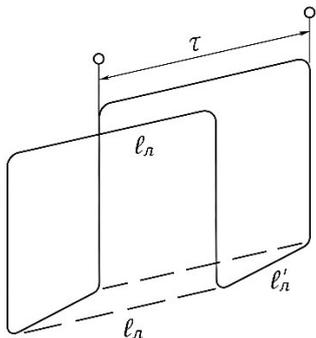


Рис. 7. Здвоєна шаблонна секція для двостороннього якоря лінійного двигуна

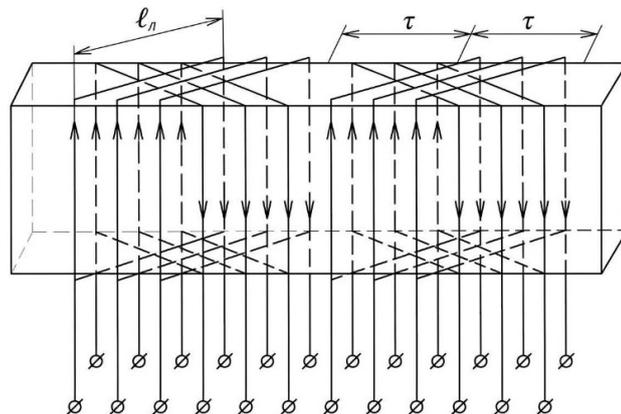


Рис. 8. Шаблонна обмотка двостороннього якоря з поперечним потоком в ярмі якоря

Висновки

Розглянуто можливість використання для рухомого якоря лінійного двигуна постійного струму обмоток барабанного якоря та спеціальних обмоток, наведено їх особливості, недоліки та переваги, дані рекомендації для застосування в залежності від конфігурації магнітної системи.

Література

1. Лінійна електрична машина постійного струму: авт. св. СРСР № 1045335; опубл. 30.09.1983, Бюл. № 36.
2. Лінійний двигун постійного струму: пат. Україна № 110250; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.
3. Веселов Г.У., Ребров С.А., Шаповаленко А.Т. Лінійні асинхронні двигуни. Київ: Техніка, 1975.
4. Одношарова петльова обмотка якоря лінійного електродвигуна постійного струму: авт. св. СРСР №448541; опубл. 30.10.1974, Бюл. № 40.
5. Двошарова петльова обмотка: авт. св. СРСР № 480155; опубл. 05.08.1975, Бюл. № 29.
6. Двошарова хвильова обмотка якоря лінійного двигуна: авт. св. СРСР № 513453; опубл. 05.06.1976, Бюл. № 17.
7. Шаблонна обмотка якоря лінійного двигуна постійного струму: поз. рішення за заявкою № 202404898 від 30.03.2024 / Косенков В.Д., Лісевич С.П., Поліщук О.С., Поліщук А.О.
8. Якір лінійного електродвигуна постійного струму: авт. св. СРСР № 629611; опубл. 25.10.1978, Бюл. № 39.

References

1. Linear direct current electric machine. USSR Author's Certificate No. 1045335, dated 30 Sep 1983, Bulletin No. 36.
2. Linear direct current motor. Patent of Ukraine No. 110250, dated 25 Oct 2016, Bulletin No. 20.
3. Veselov G.U., Rebrov S.A., Shapovalenko A.T. Linear induction motors. Kyiv, «Tekhnika», 1975.
4. Single-layer lap armature winding of a linear direct current electric motor. USSR Author's Certificate No. 448541, dated 30 Oct 1974, Bulletin No. 40.
5. Double-layer lap winding. USSR Author's Certificate No. 480155, dated 05 Aug 1975, Bulletin No. 29.
6. Double-layer wave armature winding of a linear motor. USSR Author's Certificate No. 513453, dated 05 Jun 1976, Bulletin No. 17.
7. Template armature winding of a linear direct current motor. Utility model decision for application No. 202404898, dated 30 Mar 2024. Kosenkov V.D., Lisevych S.P., Polishchuk O.S., Polishchuk A.O.
8. Armature of a linear direct current electric motor. USSR Author's Certificate No. 629611, dated 25 Oct 1978, Bulletin No. 39.