

УДК 621.313.323

## Експериментальне визначення параметрів та дослідження характеристик лінійної машини вібраційної дії

Роман Бондар

Київський національний університет будівництва і архітектури  
Повітрофлотський пр-т, 31, Київ, Україна, 03680  
[rpbondar@gmail.com](mailto:rpbondar@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-0198-5548](https://orcid.org/0000-0002-0198-5548)

Отримано 20.03.2018; прийнято 14.04.2018  
DOI: 10.26884/gbdmm1891.0302

**Анотація.** Велике значення під час проектування та виготовлення пристроїв з лінійними машинами (ЛМ) відводиться побудові відповідних математичних моделей. Будь-яка модель має обмеження й функціонує в межах прийнятих припущень, що відповідають меті моделювання. З метою спрощення розрахункових рівнянь часто нехтують нелінійними властивостями феромагнітних матеріалів магнітопроводів, неінерційністю в часі параметрів машини, залежністю останніх від струму, частоти або температури, впливом вихрових струмів, гістерезису тощо.

Найбільш надійним способом перевірки розробленої моделі є проведення експериментальних досліджень реально існуючого прототипу пристрою. Під час таких досліджень можна оцінити вплив механічних, електромагнітних чи теплових процесів, що не враховані в математичній моделі. Достовірність отриманих результатів значно залежить від досконалості обладнання, вибору експериментальних методик, точності вимірювальних приладів. Для випробувань лінійних машин вібраційної дії важливим є одночасна реєстрація механічних та електричних величин, як функцій часу.

На відміну від традиційних обертових електричних машин, для яких розроблено різноманітне випробувальне й навантажувальне обладнання, для машин вібраційної дії такий досвід поки що відсутній. Тому актуальним лишається питання створення дослідних стендів для отримання експлуатаційних характеристик та визначення параметрів ЛМ.

Метою даної роботи є розробка дослідного стенду для випробування лінійних машин вібраційної дії в різних режимах роботи та проведення експериментальних досліджень характе-

ристик дослідного зразка магнітоелектричної лінійної машини згідно представлених методик.

**Ключові слова:** вібратор, дослідний стенд, лінійна машина, статичні характеристики, тягова характеристика.

### ВСТУП

Робочі процеси багатьох машин і механізмів передбачають використання вібраційного руху робочого органу. Лінійні двигуни досить широко використовуються у якості приводів компресорів, насосів, виконавчих механізмів, вібраторів, електроінструменту [1] тощо. На сьогоднішній день вони є альтернативою традиційним приводам на основі обертових машин з передачами, що перетворюють обертальний рух в прямолінійний. Лінійні електричні генератори використовують в силових установках гібридних автомобілів [2] для перетворення енергії морських хвиль [3], та інших джерелів відновлювальної енергії.

Характеристики ЛМ вібраційної дії можна розділити на статичні, квазістатичні та динамічні. До статичних характеристик відносять тягові, навантажувальні, енергетичні (потужність, ККД, амплітуда коливань, коефіцієнт потужності), теплові. До квазістатичних відносять миттєві електро-механічні процеси машини в усталених режимах роботи. В якості динамічних характеристик необхідно досліджувати перехідні електромеханічні процеси під час зміни режиму роботи машини чи навантаження.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛМ В РЕЖИМІ ДВИГУНА

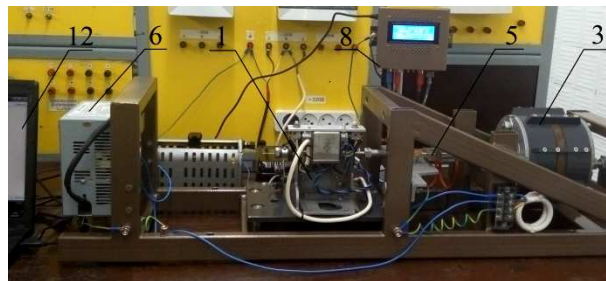
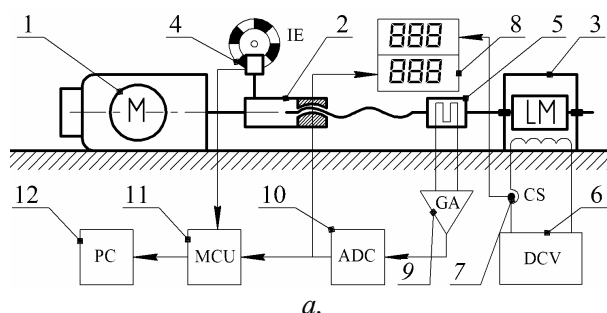
Питання створення стендів для дослідження ЛМ в статичних режимах висвітлювалось, зокрема, в роботах [4, 5], де представлено конструкції стендів для дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку лінійних двигунів. Розробці стендів для отримання тягових характеристик присвячено роботи [6-8]. Для знімання останніх дослідний двигун навантажують різними масами, що під дією сили гравітації утворюють осьове зусилля на якорі. Інакше, вимірюють значення електромагнітної сили за допомогою динамометрів.

Тягова характеристика визначає здатність двигуна виконувати роботу. Внаслідок явнополюсної структури чи особливостей геометрії машини, значення електромагнітної сили, як правило, залежить не тільки від струму в обмотці, але є також функцією положення якоря. В двигунах вібраційної дії переміщення якоря відбувається в межах полюсної поділки. Тому конструкція дослідного стенду має забезпечувати необхідний діапазон переміщення, а система керування – необхідне значення струму.

Знімання тягових характеристик за допомогою стендів представлених в роботах [6-8], можливе тільки за певного напрямку струму в обмотці, що пов'язано з постійним напрямом дії сили тяжіння та сили реакції динамометра. Цей напрям має бути протилежним до напрямку електромагнітної сили машини. Тому для несиметричних машин (під несиметрією тут і далі розуміється залежність модуля електромагнітної сили від напрямку струму для одних і тих самих положень якоря та значень струму) доводиться змінювати її кріплення в протилежний бік. Конструкція запропонована в [9] знімає це обмеження, але потребує встановлення двох шківів з чотирма масами. Це ускладнює методику отримання характеристик та збільшує сили тертя, які складно враховувати під час визначення електромагнітних сил.

Для усунення зазначених недоліків пропонується конструкція показана на Рис. 1.

Стенд для досліджень ЛМ вібраційної дії має приводний двигун 1, який за допомогою передачі «гвинт-гайка» 2 приєднується до дослідної машини 3. Перевагою такої передачі є значний вигравш у силі, висока точність переміщення, великі зусилля при невеликих розмірах. З метою підвищення ККД механічної передачі, гвинт, для зменшення сили тертя, виготовляється з бронзи.



**Рис.1.** Схема (а) та зовнішній вигляд (б) дослідного стенду

**Fig. 1.** Block diagram (a) and design (b) of the experimental setup

Вимірювання положення якоря виконується за допомогою оптичного датчика 4 (інкрементний енкодер). Між тяговим двигуном та дослідною машиною закріплені S-подібний тензометричний датчик сили 5. Джерело постійної напруги 6 забезпечує необхідне значення струму, що вимірюється датчиком 7 та реєструється приладом 8.

Сигнал, пропорційний електромагнітній силі, підсилений підсилювачем 9, подається на вхід АЦП 10, звідки значення вимірюваної сили надходить до мікроконтролера 11. Останній забезпечує передачу даних на вимірювальний прилад 8 та персональний комп'ютер 12, який виконує функцію реєстратора. Значення лінійного переміщення перераховується мікроконтролером відповідно до кількості імпульсів енкодера та кроку різьби гвинтової передачі.

Основні технічні характеристики стенду наведено в Табл. 1.

**Таблиця 1.** Основні технічні характеристики стенда

**Table 1.** The main technical characteristics of the experimental setup

Робочий хід		± 60 мм
Максимальне тягове зусилля		780 Н
Тензодатчик	тип тензодатчика	консольний KELI DEG
	номінальне навантаження	100 кг
	відносна похибка	±0,03 %
	чутливість	3,0±0,003 мВ/В
АЦП тензодатчика	тип АЦП	NX711
	розрядність	24 біт
	коефіцієнт підсилення підсилювача	128
Датчик струму	тип датчика	датчик Хола ACS 723
	діапазон вимірюваного струму	± 5 А
	нелінійність характеристики	± 1 %
	чутливість	400 мВ/А
	похибка чутливості	± 2 %
Приводний двигун	тип	синхронний з вбудованим редуктором СД-54
	номінальна напруга живлення	220 В
	корисна потужність на валу	10 Вт
	частота обертання вихідного валу	3,14 об/хв
	пусковий момент	0,588 Н·м
Мікроконтрлер	тип	ATmega2560
	тактова частота	16 МГц
Габаритні розміри стенду	довжина	1010 мм
	ширина	240 мм
	висота	240 мм

Суттєвою відмінністю розробленого стенду від аналогічних конструкцій є відсутність обмежень щодо напрямку струму в обмотці машини, що дозволяє отримувати тягові характеристики безпосередньо з процедури досліду в автоматичному режимі. Це стало можливим завдяки застосуванню між дослідним та приводним двигуном жорсткої передачі типу «гвинт-гайка» та тензодатчика двонаправленого типу дії.

Дана особливість стенду дає можливість виконувати знімання тягових характеристик несиметричних машин, а також безпосередньо врахувати вплив сил тертя.

Методика знімання тягової характеристики за допомогою стенду є наступною.

В обмотці дослідної машини встановлюється задане значення струму. За допомогою тягової машини (синхронний двигун), через передачу «гвинт-гайка», якір машини рівномірно переміщується в діапазоні робочого ходу.

Фізичні процеси, що відбуваються в обмотці під час руху, описуються другим законом Кірхгофа, відповідно до якого

$$U = iR_s + \frac{d\Psi(x_a, i)}{dt},$$

де  $U$  – напруга джерела;  $R_s$ , – активний опір обмотки;  $\Psi(x_a, i)$  – потокозчеплення обмотки в залежності від положення якоря  $x_a$  та струму обмотки  $i$ .

Оскільки швидкість руху якоря незначна (3,14 мм/хв) і практично постійна, останньою складовою рівняння можна знехтувати. Це дає можливість підтримувати незмінне значення струму в обмотці, під час переміщення якоря машини, без застосування регулятора струму.

До якоря дослідної машини прикладаються електромагнітна сила  $F_e$ , сила тяги привідного двигуна  $F_{th_f}$ , й сила тертя в напрямних якоря  $F_f$ , спрямована проти напрямку швидкості руху  $v_a$ . Рівняння балансу сил для даної електромеханічної системи, за умови, що напрям електромагнітної сили дослідної машини є протилежним до напрямку переміщення, матиме вигляд

$$m_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} = -F_e + F_{th_f} - F_f,$$

де  $m_a$  – маса рухомої частини (якоря).

При рівномірному русі якоря прискорення дорівнює нулю й рівняння набере вигляду

$$F_e = F_{th_f} - F_f. \quad (1)$$

Схему дії сил показано на Рис. 2, а.

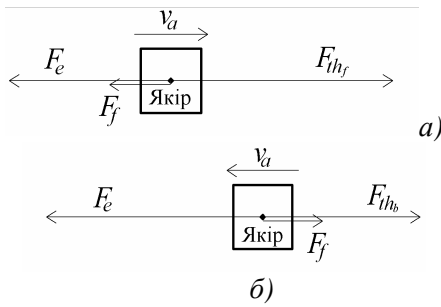


Рис. 2. Схема дії сил

Fig. 2. Force diagram

Під час руху якоря в зворотному напрямку змінюється напрям швидкості, а отже напрям сили тертя (Рис. 2, б), й рівняння рівноваги сил є наступним:

$$F_e = F_{th_b} + F_f, \quad (2)$$

де  $F_{th_b}$  – сила тяги приводного двигуна в зворотному напрямку.

Значення сили тяги (в однакових положеннях якоря) вимірюється тензодатчиком із заданим кроком під час прямого та зворотного ходів. За даними двох вимірів, для фіксованих положень якоря, можливо розрахувати значення електромагнітної сили:

$$F_e = \frac{F_{th_b} + F_{th_f}}{2},$$

та силу тертя:

$$F_f = \frac{F_{th_f} - F_{th_b}}{2}.$$

За наведеною методикою було проведено експериментальне дослідження тягових характеристик циліндричної магнітоелектричної ЛМ, будову якої представлено на Рис. 3.

Статор 1 машини містить осердя з двома феромагнітними полюсами 2 між якими розміщена обмотка 3. Для покращення питомих силових показників в магнітопроводі статора застосовано постійний магніт 4 торіодної форми. Електромагнітна сила машини визначається силою та напрямком

струму в обмотці, а також положенням феромагнітного якоря 5 відносно статора.

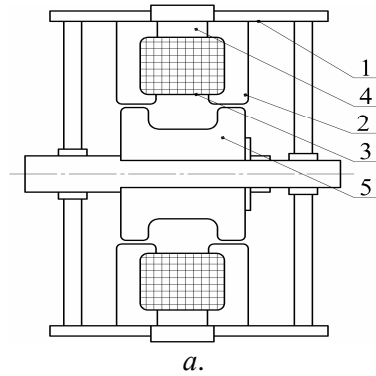


Рис. 3. Будова (а) та зовнішній вигляд (б) дослідної машини

Fig. 3. Arrangement and appearance of the machine for the testing

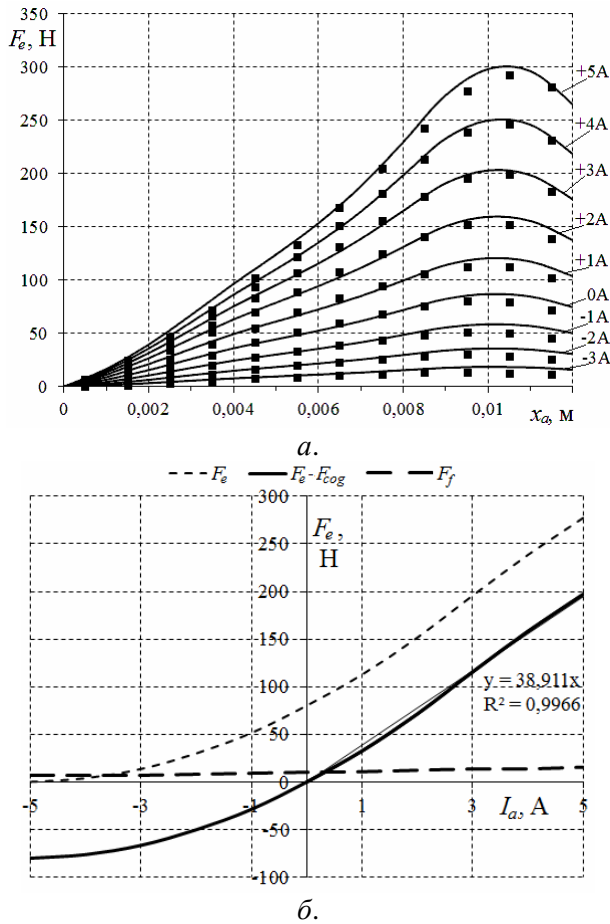
Основні параметри машини наведено в Табл. 2.

Таблиця 2. Основні параметри машини

Table 2. Basic machine parameters

Робочі параметри			
Робоча амплітуда коливань		м	0,01
Максимальна амплітуда коливань		м	0,015
Фізичні параметри			
Постійний магніт	матеріал	NdFeB (N42)	
	залишкова магнітна індукція	Тл	1,3
Обмотка	кількість витків	380	
	дріт	ПСД, Ø 1,12	
Основні розміри			
Повітряний проміжок		мм	0,7
Полюсна поділка		мм	36
Габаритні розміри	діаметр	мм	160
	довжина	мм	120

Експериментальні залежності електромагнітної сили  $F_e$  від положення якоря  $x_a$  для сталих значень струму в обмотці, отримані згідно представленої вище методики, показані на Рис. 4, а (маркером). Внаслідок симетричності характеристики відносно початку координат, залежності наведено для умовного додатного напрямку зміщення від положення рівноваги. Рис. 4, б ілюструє залежність електромагнітної сили від струму обмотки для випадку розташування якоря на відстані 0,01 м від положення електромагнітної рівноваги (положення коли полюси якоря розміщуються проти полюсів статора й осьова електромагнітна сила рівна нулю).



**Рис. 4.** Силлові характеристики дослідної машини

**Fig. 4.** Traction characteristics of the tested machine

Отримані характеристики дозволяють визначити робочу амплітуду та коефіцієнт електромагнітної сили  $K_{Fe}$  лінійної машини. З даних, наведених на Рис. 4, а, випливає,

що в межах переміщення якоря 0...0,01 м силова характеристика є практично лінійною. Найменше значення середньоквадратичного відхилення від апроксимаційної прямої становить  $R^2 = 0,977$  (для кривої +5А).

Для визначення коефіцієнту електромагнітної сили необхідно врахувати, що в даному випадку сила представлена двома складовими. Одна зумовлена протіканням струму в обмотці, інша – наявністю сил тяжіння між зубцями статора і якоря. Остання має місце за відсутності струму в обмотці (крива 0 А на Рис. 4, а), й для показаного на Рис. 4, б положення становить 80,2 Н. Віднявши силу зчеплення між зубцями  $F_{cog}$ , отримаємо силу, зумовлену протіканням струму в обмотці (крива  $F_e - F_{cog}$  на Рис. 4, б).

Як видно з рисунку, ця крива є практично лінійною для додатних значень струму ( $R^2 = 0,9966$ ) та нелінійною для від'ємних. В залежності від призначення машини, дана обставина може зумовити не досить ефективну роботу за від'ємних значень струму. Визначений для додатних значень коефіцієнт електромагнітної сили становить  $K_{Fe} = 38,911$  Н/А.

Крива  $F_f$ , показана на Рис. 4, б, ілюструє силу тертя в залежності від струму. Отримані дані свідчать про її зростання пропорційно струму обмотки. Це пояснюється впливом радіальної складової електромагнітної сили, яка виникає внаслідок несиметричного розташування якоря відносно статора та її збільшенням зі зростанням струму. Наведена методика вимірювання тягової характеристики та конструкція стенду, дозволяють врахувати дану особливість, оскільки сила тертя, що входить до рівнянь (1, 2) однакова для прямого та зворотного напрямку руху за умови фіксованого значення струму обмотки.

Дані експериментальних досліджень силових характеристик добре узгоджуються з результатами порівняльного розрахунку чисельним методом скінчених елементів. Останні показано на Рис. 4, а суцільними лініями.

Розрахунок даних характеристик виконувався за допомогою вирішення польової



задачі. Внаслідок осьової симетрії машини (див. Рис. 3, *a*) задача вирішувалась в осесиметричній постановці, в циліндричній системі координат, з використанням рівнянь магнітостатики [10].

Диференційні рівняння, записані відносно векторного магнітного потенціалу, мають вигляд:

$$\begin{aligned}\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) &= \mathbf{J}_e; \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A},\end{aligned}$$

де  $\nabla = e_r \frac{\partial}{\partial r} + e_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} + e_z \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор

набла, записаний для циліндричної системи координат;  $e_r, e_\phi, e_z$  – орти циліндричної системи координат;  $\mu = \mu_0 \mu_r$  – абсолютна магнітна проникність;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму;  $\mu_r$  – відносне значення магнітної проникності (скалярна величина), що залежить від модуля вектора магнітної індукції;  $\mathbf{J}_e$  – густина струму в обмотці;  $\mathbf{B}$  – магнітна індукція.

Магнітний стан матеріалу магнітопроводів визначається відповідно до основної кривої намагнічування сталі, тобто

$$\mathbf{H} = f(|\mathbf{B}|) \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|},$$

де  $\mathbf{H}$  – напруженість магнітного поля.

Як граничні умови задано умову осьової симетрії та умову магнітної ізоляції на зовнішніх границях розрахункової області. В якості вихідних даних задано струм обмотки, кількість її витків й переріз провідника, параметри постійного магніту (див. Табл.2).

Значення електромагнітної сили визначалось інтегруванням тензора тяжіння  $\mathbf{T}$  Максвелла по поверхні якоря згідно наступного виразу

$$\mathbf{F}_e = \int_S 2\pi r n \mathbf{T} dS,$$

де  $\mathbf{n}$  – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні якоря  $S$ ;  $r$  – відстань від

осі симетрії до поверхні інтегрування. При цьому розраховувалась осьова компонента сили.

## ВИСНОВКИ

Наведена методика та конструкція дослідного стенду дозволяє знімати тягові характеристики лінійних машин вібраційної дії незалежно від напрямку струму в обмотці. Застосування методики полегшує дослідження несиметричних машин, а також дозволяє безпосередньо враховувати вплив сили тертя, і її залежність від сили струму в обмотці.

Отримані за допомогою розробленого стенду результати експериментальних досліджень свідчать про добре узгодження електромагнітних процесів дослідної машини з даними розрахунку.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Boldea I., Syed A. Nasar.** Linear Electric Actuators and Generators. Cambridge University Press, 2005, 237 p.
2. **Cawthorne W. R., Famouri P., Chen J., Clarke N. N., McDaniel T. I., Atkinson R. J., Nandkumar S., Atkinson C. M., and Petreanu S.** Development of a linear alternator-engine for hybrid electric vehicle applications. IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 48, No. 6, 1999, pp. 1797-1802.
3. **Baker N.** Linear Generators for Direct Drive Marine Renewable Energy Converters. A thesis for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD). University of Durham, 2003.
4. **Голенков Г. М., Пархоменко Д. І.** Розподіл магнітної індукції лінійного синхронного двигуна з магнітним підвісом // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 1. – С. 22-25.
5. **Голенков Г.М., Веремеєнко А.В., Богаєнко Н.В., Попков В.С.** Распределение магнитной индукции в зазоре коаксиально-линейного асинхронного двигателя с фазной обмоткой на бегуне // Електротехніка і Електромеханіка. – 2009. – №6. – С. 18-20.
6. **Голенков Г. М., Пархоменко Д. І.** Електромеханічні тягові характеристики коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами та магнітним підвісом // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 56-59.

7. **Веремеенко А. В.** Моделирование электро-механических тяговых характеристик линейного асинхронного двигателя с фазным бегуном // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. – Кіровоград: КНТУ. – 2012. – Вип. 42, ч. 2. – С. 228-238.
8. **Голенков Г.М., Аббасян Мохсен.** Электромеханические характеристики коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 64-69.
9. **Хитерер М.Я., Овчинников И.Е.** Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.:КОРОНА принт, 2004. – 368 с.
10. **Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.** Мультифизическое моделирование в электротехнике. Монография. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, – 2015. – 305 с.
6. **Golenkov G.M., Parkhomenko D.I., 2014.** Elektromekhanichni tiahovi kharakterystyky koaksialno-liniinoho dvyhuna z postiinyym mahnitamy ta mahnitnym pidvisom [The electromechanical propulsion performance characteristics of tubular linear motor with permanent magnet bracket]. Tekhnichna elektrodynamika, Nr.6, 56-59. (in Ukrainian).
7. **Veremeenko A.V., 2012.** Modelirovanie elektromekhanicheskikh tyagovykh harakteristik lineynogo asinhronnogo dvgatelya s faznym begunom [Modeling of electromechanical propulsion characteristics of the linear asynchronous motor with a phase mover]. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn, Nr.42(2), 228-238.
8. **Golenkov G.M., Abbasyan Mohsen, 2014.** Elektromekhanicheskie harakteristiki koaksialno-lineynogo dvgatelya s aksialnyim i radialnyim napravleniyami namagnichvaniya postoyannykh magnitov [Electromechanical characteristics of tubular linear motor with axial and radial direction of the permanent magnet magnetization]. Tekhnichna elektrodynamika, Nr.3, 64-69. (in Russian).
9. **Hiterer M.Ya., Ovchinnikov I.E., 2004.** Sinhronnyie elektricheskie mashyny vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya [Synchronous electrical machines of reciprocating motion]. SPb., KORONA print, 368. (in Russian).
10. **Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., 2015.** Multifizicheskoe modelirovanie v elektrotehnike [Multiphysics modeling in electrical engineering]. Kiev, Ukrainian National academy of sciences, institute of electrodynamics, 305. (in Russian).

#### REFERENCES

1. **Boldea I., Syed A. Nasar., 2005.** Linear Electric Actuators and Generators. Cambridge University Press, 237.
  2. **Cawthorne W.R., Famouri P., Chen J., Clarke N.N., McDaniel T.I., Atkinson R.J., Nandkumar S., Atkinson C.M., and Petreanu S., 1999.** Development of a linear alternator-engine for hybrid electric vehicle applications. IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 48, Nr.6, 1797-1802.
  3. **Baker N., 2003.** Linear Generators for Direct Drive Marine Renewable Energy Converters. A thesis for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD), University of Durham.
  4. **Golenkov G.M., Parkhomenko D.I., 2013.** Rozpodil mahnitnoi induktsii liniinoho synkhronnogo dvyhuna z mahnitnym pidvisom [Magnetic induction distribution in a linear synchronous motor with magnetic suspension]. Elektrotehnika i elektromekhanika, Nr.1, 22-25. (in Ukrainian).
  5. **Golenkov G.M., Veremeenko A.V., Bogaenko N.V., Popkov V.S., 2009.** Raspre-delenie magnitnoy induktsii v zazore koaksialno-lineynogo asinhronnogo dvgatelya s faznoy obmotkoy na begune [Magnetic induction distribution in the air gap of a coaxial linear induction motor with a phase winding on the mover]. Elektrotehnika i Elektromekhanika, Nr.6, 18-20. (in Russian).
- Experimental determination and investigation of parameters and characteristics of oscillatory linear machine**
- Roman Bondar*
- Abstract.** The great importance during design and production of devices with linear machines is given to develop of the corresponding mathematical models. Any model has its restrictions. The model functions within the accepted assumptions which are corresponding to the modeling purpose. For the simplification of the calculation equations, the nonlinear properties of ferromagnetic materials of magnetic conductors often are neglected, as well as not inertance of parameters of the machine in time, their dependence from current, frequency or temperature, influence of Eddy currents, etc.

The most reliable way for validation of the developed model is carrying out experimental studies of a real prototype of the device. During such researches it is possible to estimate influence of mechanical, electromagnetic or thermal processes which are not considered in mathematical model. Reliability of the received results considerably depends on quality of the equipment, a choice of experimental techniques, and the accuracy of measuring devices. For the testing of linear oscillatory machines, simultaneous registration of mechanical and electrical characteristics, as functions of time is essential.

Unlike traditional rotary electrical machines for which the different test and load equipment is developed, for linear oscillatory machines such experience is absent so far. Therefore the problem of creation of experimental setups for obtaining operation properties and determination of parameters of linear machines is important today.

The purpose of this work is development of the experimental setup for researches of linear oscillatory machines in different operating modes and carrying out experimental studies of characteristics of the test specimen of magnetoelectric linear motor in according with the provided techniques.

**Key words:** vibrators, experimental setup, linear machine, static characteristics, traction characteristic.