

*Р.П. БОНДАР***АНАЛІЗ МАГНІТНИХ ВТРАТ ВІБРАЦІЙНОГО ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА З РУХОМИМИ МАГНІТАМИ**

У будівельній галузі є потреба в створенні надійних, безпечних та ефективних вібраційних машин із частотою коливань 100 Гц і більше, та незначним рівнем шуму. Таким вимогам цілком можуть відповідати приводи з лінійними двигунами вібраційної дії за умови збільшення їх ефективності на високій робочій частоті. Потужність втрат у вібраційних лінійних двигунах суттєво залежить від режиму роботи, зокрема частоти, амплітуди коливань та струму в обмотці. Представлена стаття присвячена дослідженню магнітних втрат двигуна в робочому режимі. Розрахунок втрат виконується за допомогою мультифізичної моделі, що суміщає вирішення рівнянь електричного й магнітного кіл, та рівняння механічного руху. Еквівалентна механічна схема представлена зосередженою масою, яка здійснює коливання під дією електромагнітної сили двигуна. Силова характеристика навантаження подана сумою пружної компоненти, пропорційної до переміщення бігуна, та сили в'язкого тертя, пропорційної його швидкості. Чисельний розрахунок польової задачі виконується методом скінченних елементів в осесиметричній постановці на підставі рівнянь квазістационарного магнітного поля в часовій області із застосуванням рухомого типу розрахункової сітки. За результатами розрахунку розподілу поля та його характеру зміни в часі, досліджено магнітні втрати машини за допомогою моделі, що розділяє сукупні магнітні втрати на три складники – втрати на гістерезис, вихрові струми, та додаткові або аномальні втрати. Показано, що основна частка втрат концентрується в куткових зонах магнітопроводів та постійних магнітів. Інтенсивність втрат зменшується зі збільшенням механічного навантаження через зменшення амплітуди коливань та швидкості бігуна. В режимі невеликого навантаження, через зростання швидкості, відбувається суттєве збільшення магнітних втрат як у сталі, так і в постійних магнітах. Тому такий режим не може бути рекомендований як тривалий через ризик перегріву машини та постійних магнітів, властивості яких істотно залежать від температури. Потужність втрат зі зростанням навантаження наближається до втрат короткого замикання, що спричинені зміною МРС обмотки статора.

Ключові слова: вібраційний лінійний двигун, магнітні втрати, метод скінченних елементів, механічна схема, мультифізична модель, рухома сітка.

*R.P. BONDAR***LOSS ANALYSIS OF MOVING MAGNET LINEAR OSCILLATING MOTOR**

In the construction industry, there is a need to create reliable, safe and efficient vibration machines with an oscillation frequency of 100 Hz and more, and a low noise level. Drives with linear oscillating motors can fully meet these requirements, provided that their efficiency is increased at a high operating frequency. The power losses in vibrating linear motors significantly depend on the operating mode, in particular the frequency, oscillation amplitude and winding current. The presented article is devoted to the study of the magnetic losses of the motor in the operating mode. The calculation of losses is performed using a multi-physics model that combines the solution of the equations of the electric and magnetic circuits and the equation of mechanical motion. The equivalent mechanical scheme is represented by a concentrated mass that oscillates under the action of the electromagnetic force of the motor. The load force characteristic is given by the sum of the elastic component, proportional to the movement of the mover, and the viscous friction force, proportional to its speed. The numerical calculation of the field problem is performed by the finite element method in an axisymmetric formulation based on the equations of a quasi-stationary magnetic field in the time domain using a moving type of calculation mesh. Based on the calculation results of the field distribution and its change in time, the magnetic losses of the machine are investigated using a model that divides the total magnetic losses into three components - hysteresis losses, eddy currents, and additional or anomalous losses. It is shown that the main share of losses is concentrated in the corner zones of magnetic cores and permanent magnets. The intensity of losses decreases with increasing mechanical load due to a decrease in the oscillation amplitude and the mover speed. In the low-load mode, due to an increase in speed, there is a significant increase in magnetic losses in both steel and permanent magnets. Therefore, such a mode cannot be recommended as long-term due to the risk of overheating of the machine and permanent magnets, the properties of which significantly depend on temperature. The power loss with increasing load approaches the short-circuit losses caused by the change in the MMF of the stator winding.

Keywords: equivalent mechanical scheme, finite element method, magnetic losses, moving mesh, multi-physics model, vibrating linear motor.

Вступ. Робочі процеси багатьох машин і механізмів передбачають використання вібраційного руху робочого органу. Лінійні машини досить широко використовуються в приводах компресорів, насосів, виконавчих механізмів, вібраторів, електроінструменту тощо. Зменшення споживання, перехід до екологічно чистих приводів (силові установки гібридних автомобілів) та джерел відновлювальної енергії (використання енергії хвиль), сприяють збільшенню частки лінійних машин у різних системах перетворення енергії, технологічних установках та ін. [1-3].

У будівельній галузі є потреба в створенні надійних, безпечних та ефективних вібраційних машин із частотою коливань 100 Гц і більше, та незначним рівнем шуму. Таким вимогам цілком можуть відповідати приводи з лінійними двигунами (ЛД) вібраційної дії за умови збільшення їх ефективності на високій робочій частоті. Залежно від конструкції та режиму роботи, вплив магнітних втрат на характеристики машини

може бути досить суттєвим. Тому під час проєктування таких пристроїв важливо точно враховувати магнітні втрати в різних робочих режимах. Це особливо стосується машин невеликої потужності з масивними полюсами, в яких потужність втрат має значну частку в загальному балансі потужностей. Отже, дослідження втрат у лінійних двигунах вібраційної дії, а також розроблення математичних моделей для їх урахування є актуальною задачею.

На виникнення та інтенсивність магнітних втрат у ЛД впливають такі основні чинники: зміна МРС обмотки в часі внаслідок зміни струму; зміна провідності повітряного проміжку та провідності крайових потоків під час руху бігуна; зміна поля внаслідок руху полюсів статора та бігуна; наявність зубцевих гармонік МРС статора та бігуна.

Для практичного розрахунку магнітних втрат сьогодні здебільшого використовують спеціалізовані програмні пакети, що забезпечують вирішення рівнянь

© Р.П. Бондар, 2026

електромагнітного поля, та його розподілу в об'ємі машини. Зазвичай розрахунок обмежується вихровими втратами, оскільки в суцільних середовищах вони можуть визначитися безпосередньо за результатами вирішення польової задачі, а в шихтованих досить точно описуються аналітично. Зазначений підхід реалізовано, зокрема, в роботах [4-8].

Більш розгорнутий аналіз може бути виконаний за допомогою різних модифікацій емпіричної формули Штейнмеца [9], або моделі Бертотті [10], остання з яких розділяє сукупні магнітні втрати на три складники – втрати на гістерезис, втрати на вихрові струми, та додаткові або аномальні втрати. Такий підхід реалізовано, зокрема, в роботах [11, 12].

Зазвичай, втратами від вихрових струмів у постійних магнітах рухомого магнітного транслятора лінійного двигуна нехтують, і це припущення є прийнятним для феритових магнітів, оскільки їхня провідність досить низька. Однак рідкоземельні спечені магніти, такі як неодим-залізо-бор (NdFeB) або самарій-кобальт (SmCo), мають порівняно високу електропровідність. Тому вихрові струми, що виникають у магнітах у високошвидкісних режимах роботи, можуть бути суттєві і призвести до втрати магнітних властивостей через високу температуру нагрівання. Загальним способом зменшення зазначених втрат є повна або часткова сегментація магнітів [8, 13], що знижує інтенсивність вихрових струмів.

У всіх вищезгаданих роботах втрати розраховуються для стаціонарних режимів без урахування динаміки роботи пристрою. Однак механізм генерації втрат у двигуні вібраційного руху безпосередньо пов'язаний із режимом його роботи й має розглядатися сукупно з навантаженням та його механічною схемою.

Метою дослідження є визначення чинників, які впливають на інтенсивність втрат вібраційного лінійного двигуна з рухомими магнітами залежно від режиму його роботи.

Конструкція вібраційного ЛД із рухомими магнітами. В лінійних електричних машинах вібраційної дії, внаслідок значних механічних навантажень, перевага надається циліндричній топології, що забезпечує більшу міцність. Схематичне зображення однофазного циліндричного ЛД показано на рис. 1. Тут рухомий відносно статора бігун має феромагнітні полюси та постійні магніти, що намагнічені в осьовому напрямку. Крім електромагнітних, на бігун діють сили пружності, зумовлені пружною системою, а також сили тертя в направляючих бігуна та конструкційне тертя, пов'язане з втратами в пружинах. Сила навантаження може прикладатися безпосередньо до бігуна, або діяти через пружну систему відповідно до механічної схеми та кількості рухомих мас.

Залежно від потрібних характеристик та режиму роботи, обмотка двигуна може бути однофазною [14], або багатofазною [15]. Однофазна конфігурація є більш поширеною, внаслідок спрощення системи керування, тому вона й буде розглядатися далі. Основні характеристики дослідного ЛД приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики ЛД

Полюсна поділлка, м	0,035
Зовнішній діаметр постійних магнітів, м	0,05
Висота постійних магнітів, м	0,014
Кількість пазів статора	12
Кількість постійних магнітів	4
Кількість полюсів бігуна	5
Залишкова магнітна індукція постійних магнітів B_{rem} , Тл	1,28
Зовнішній діаметр статора, м	0,097

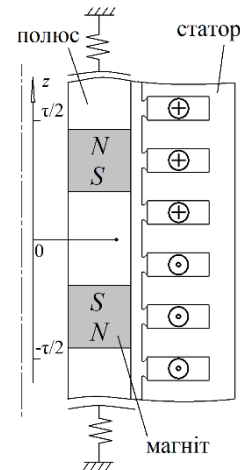


Рис. 1. Схематичне зображення пари полюсів вібраційного лінійного двигуна з рухомими магнітами

Модель для визначення втрат у феромагнітних магнітопроводах. Для практичного розрахунку магнітних втрат в осердях електричних машин зазвичай застосовують різні модифікації емпіричної формули Штейнмеца [9]. У подальших дослідженнях [10] було запропоновано модель, що розділяє сукупні магнітні втрати на три складники: втрати на гістерезис, втрати на вихрові струми, та додаткові або аномальні втрати, тобто

$$P'_{mag} = P'_{hys} + P'_{eddy} + P'_{exc}, \quad (1)$$

де

$$P'_{hys} = k_{hys} B_m^\alpha f \quad (2)$$

– втрати на гістерезис;

$$P'_{eddy} = k_{eddy} B_m^2 f^2 \quad (3)$$

– втрати на вихрові струми;

$$P'_{exc} = k_{exc} B_m^{1,5} f^{1,5} \quad (4)$$

– додаткові втрати; B_m – амплітуда магнітної індукції; α , k_{hys} , k_{eddy} , k_{exc} – коефіцієнти втрат, що залежать від матеріалу.

У рівняннях (1-4) і далі, індекс “'” позначає питомі втрати, Вт/кг.

Для обчислення втрат у магнітопроводах електричних машин за результатами вирішення польової задачі більш зручним є запис рівнянь (2-4) у часовій області, у вигляді [16]:

втрати на вихрові струми

$$P'_{eddy} = \frac{k_{eddy}}{2\pi^2} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt; \quad (5)$$

додаткові втрати

$$P'_{exc} = \frac{k_{exc}}{8,76 T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1,5} dt; \quad (6)$$

втрати на гістерезис

$$P'_{hys} = k_{hys} \frac{1}{T} B_m^\alpha. \quad (7)$$

Рівняння (5-7) визначають середню густину втрат за період T і є сумісними з аналогічними рівняннями (2-4), в чому можна переконатись, якщо підставити в (6-7) вираз для синусоїдної індукції. Наведені рівняння досить точно описують механізм магнітних втрат, і дають змогу проводити обчислення за умови будь-якої конфігурації магнітного поля та його зміни в часі, використовуючи коефіцієнти втрат класичної моделі.

Польова модель двигуна. Дослідження магнітних втрат двигуна в робочому режимі виконувалося за допомогою мультифізичної моделі, що суміщає вирішення рівнянь електричного й магнітного кіл, та рівняння механічного руху. Розв'язання польової задачі здійснювалося методом скінченних елементів в осесиметричній постановці на підставі рівнянь квазістационарного магнітного поля в часовій області із застосуванням рухомого типу розрахункової сітки.

Диференціальні рівняння поля, записані відносно векторного магнітного потенціалу, в загальному випадку мають вигляд [17]:

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e; \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A},$$

де $\nabla = e_r \frac{\partial}{\partial r} + e_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + e_z \frac{\partial}{\partial z}$ – оператор набла, записаний для циліндричної системи координат; e_r, e_φ, e_z – орти циліндричної системи координат; $\mu = \mu_0 \mu_r$ – абсолютна магнітна проникність; μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ_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.

Під час розрахунку прийнято, що осердя статора та бігуна виготовлені з холоднокатаної ізотропної електротехнічної сталі марки М350-50А. Для відповідних розрахункових областей задається нелінійна залежність намагнічування сталі [18] згідно з виразом

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

де \mathbf{H} – напруженість магнітного поля. Електрична провідність матеріалу магнітопроводів приймається близько до нуля (невелике значення провідності не впливає на точність, але підвищує стійкість алгоритму польового розрахунку).

Для областей постійних магнітів задається значення залишкової магнітної індукції 1,28 Тл та електричної провідності $7,143 \cdot 10^5$ См/м відповідного матеріалу (N40, NdFeB).

Рівняння руху бігуна вирішується за допомогою фізичного інтерфейсу рухомої сітки, реалізованого в програмі COMSOL Multiphysics [19]. Для зменшення обчислювальних витрат моделюється тільки один сегмент двигуна (пара полюсів), з огляду на лінійну періодичність поля машини (рис. 2).

Така постановка задачі не враховує вплив кінцевих ефектів двигуна на його динаміку та магнітні втрати. Цей вплив визначається топологією машини, кількістю

полюсів, полюсною поділкою тощо, і є предметом окремого дослідження.

Області статора та область повітря, що до нього прилягає, мають фіксований тип розрахункової сітки скінченних елементів (рис. 2). Тоді як рухома частина моделюється за допомогою рухливої сітки, що переміщується відповідно до поточного положення бігуна.

Рівняння руху останнього визначається прийнятою механічною схемою. Вважається, що еквівалентна механічна схема (рис. 3) представлена зосередженою масою m_a , яка здійснює коливання відносно положення механічної рівноваги з координатою $z = 0$, під дією електромагнітної сили двигуна F_e . Відновлювальні та дисипативні сили представлені через відповідні коефіцієнти жорсткості пружної підвіски k_v та в'язкого тертя b_v .

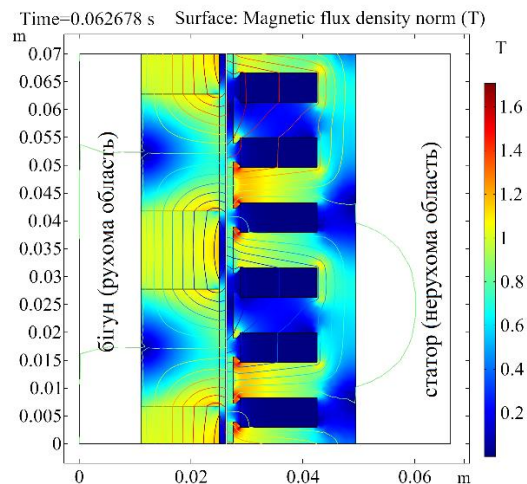


Рис. 2. Розподіл модуля магнітної індукції в перетині ЛД

Силова характеристика навантаження подана сумою пружної компоненти, пропорційної до переміщення бігуна z , та сили в'язкого тертя, пропорційної його швидкості v , тобто

$$F_l = k_l z + b_l v,$$

де k_l, b_l – відповідно коефіцієнти жорсткості та в'язкого тертя навантаження.

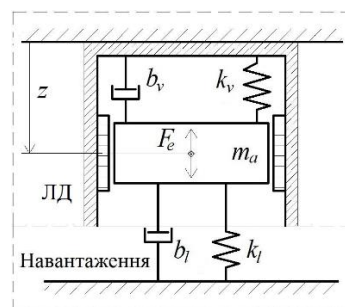


Рис. 3. Механічна схема

Електромагнітна сила, що діє на бігун, розраховується за допомогою тензора тяжіння Максвелла \mathbf{T} згідно виразу

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

де \mathbf{n} – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні бігуна S ; r – відстань від осі симетрії до поверхні

інтегрування. Водночас розраховується осьова компонента (z) електромагнітної сили.

Зміна навантаження, під час моделювання, досягається зміною коефіцієнта в'язкого тертя навантаження b_l . Частота коливань є фіксованою і відповідає частоті механічного резонансу коливальної системи.

Результати розрахунку миттєвих електромеханічних процесів (усталений режим) показані на рис. 4. Параметри механічної моделі є такими: $b = b_v + b_l = 44,2$ кг/с; маса бігуна $m_a = 1,46$ кг; сумарний коефіцієнт жорсткості $k_v + k_l = 716037$ Н/м. Частота становить $f = 111,6$ Гц.

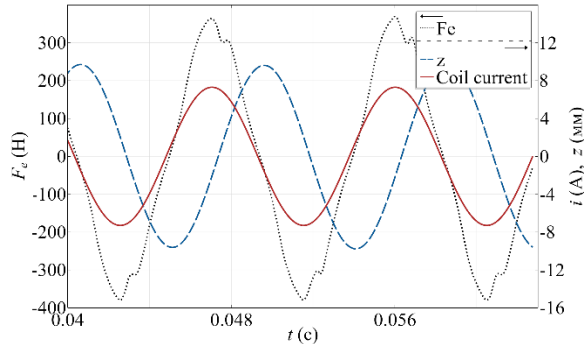


Рис. 4. Миттєві електромеханічні процеси: електромагнітна сила F_e , переміщення бігуна z та струм двигуна i

З отриманих часових залежностей, на підставі загальновідомих виразів, можуть бути розраховані діюче значення струму двигуна, а також потужності. Для показаного на рис. 4 випадку, потужність споживання становить 1136,5 Вт, механічна потужність 989,5 Вт. Діюче значення струму обмотки не змінюється під час дослідів і дорівнює 5,2 А, що становить 95 % від максимального допустимого значення $I_{max} = \sqrt{Q_w / R_s}$, де Q_w – допустима потужність теплового потоку обмотки з опором R_s . Водночас вважається, що фактична геометрія машини містить два розрахункових сегменти та параметри представлені в табл. 1, з урахуванням чого проводиться розрахунок потужностей, електромагнітної сили та магнітних втрат.

Втрати в сталі (Вт) визначаються згідно з виразами (5-7), записаними для циліндричної системи координат:

$$P_{eddy} = \frac{k_{eddy} \rho_{core}}{2\pi^2} \int_{S_{core}} 2\pi r \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left(\left| \frac{dB_r}{dt} \right|^2 + \left| \frac{dB_z}{dt} \right|^2 \right) dt dS_{core} \quad (8)$$

– втрати від вихрових струмів;

$$P_{hys} = \frac{k_{hys} \rho_{core}}{T} \int_{S_{core}} 2\pi r (B_{mr}^\alpha + B_{mz}^\alpha) dS_{core} \quad (9)$$

– втрати на гістерезис;

$$P_{exc} = \frac{k_{exc} \rho_{core}}{8,76} \int_{S_{core}} 2\pi r \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left(\left| \frac{dB_r}{dt} \right|^{1,5} + \left| \frac{dB_z}{dt} \right|^{1,5} \right) dt dS_{core} \quad (10)$$

– додаткові втрати,

де S_{core} – площа перетину магнітопроводу; $\alpha = 2,3$, $k_{hys} = 0,017$, $k_{eddy} = 8 \cdot 10^{-5}$, $k_{exc} = 0,001$ – коефіцієнти, що характеризують параметри матеріалу (шихтована електротехнічна сталь М350-50А), отримані за результатами апроксимації виразами (2-4) експериментальних

даних втрат, наведених у [20]; $\rho_{core} = 7650$ кг/м³ – густина електротехнічної сталі [18]; B_r, B_z – миттєві компоненти вектора магнітної індукції в циліндричній системі координат; B_{mr}, B_{mz} – амплітуди магнітної індукції за відповідними осями.

У кожному скінченному елементі розрахункової сітки магнітопроводів статора та бігуна, тангенціальна та радіальна компоненти магнітного поля та втрат обчислюються окремо. Наявність обох компонент зумовлює втрати від обертання вектора магнітної індукції. У цьому разі магнітні втрати з достатнім наближенням можуть розраховуватись як сума радіальної та тангенціальної компонент.

Вирази (8-10) не включають коефіцієнт заповнення пакету сталлю а також конструктивний коефіцієнт, що враховує збільшення втрат у сталі через виробничий процес виготовлення магнітопроводу. Значення першого в обертових машинах зазвичай є близьким до одиниці. В циліндричних лінійних машинах, для спрощення технології, шихтовані магнітопроводи можуть набиратися з окремих сегментів, коли кожен сегмент складається з листів електротехнічної сталі, які вкладаються в осьовому напрямку, що забезпечує відповідне протікання магнітного потоку. Така конструкція може мати порожні ділянки, що зменшує ефективний перетин магнітопроводу та коефіцієнт заповнення сталлю.

Конструктивний коефіцієнт, залежно від конструкції магнітопроводу, може бути досить значним і суттєво збільшувати втрати порівняно з даними виробника електротехнічної сталі. Ці обставини потрібно враховувати під час проектування.

Потужність втрат у постійних магнітах визначається інтегруванням по їх перетину виразу для резистивних втрат, тобто

$$P_{pm} = \int_{S_{pm}} 2\pi r \frac{1}{T} \int_{t-T}^t (J_\phi \cdot E_\phi) dt dS_{pm}, \quad (11)$$

де S_{pm} – площа перетину постійних магнітів; E_ϕ, J_ϕ – відповідно напруженість електричного поля та густина індукційного струму (ϕ -компоненти).

На рис. 5 показано розподіл питомої втрат (Вт/м³) у перетині магнітопроводів та постійних магнітів для навантаження $b = 21,1$ кг/с (амплітуда швидкості бігуна $V_m = 9,7$ м/с), звідки видно, що основна частка втрат концентрується в кутових зонах магнітопроводів та постійних магнітів наближених до повітряного проміжку.

Інтенсивність втрат зменшується зі збільшенням навантаження через зменшення амплітуди коливань та швидкості бігуна V_m . Це ілюструють залежності показані на рис. 6. Амплітуда коливань X_m^* тут представлена у відносних одиницях, як відношення фактичної амплітуди X_m до половини полюсної поділки двигуна $0,5 \cdot \tau$.

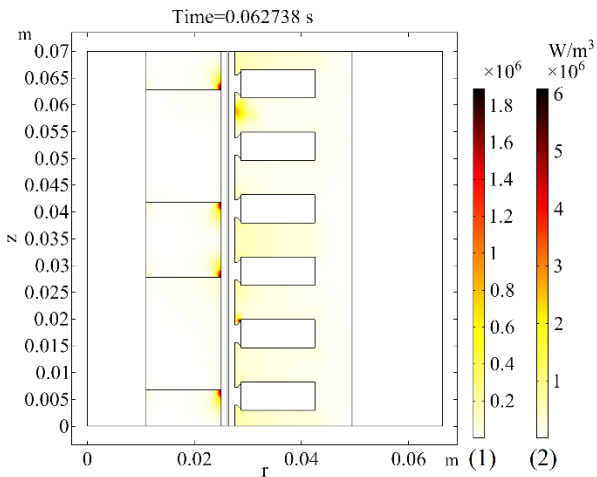


Рис. 5. Розподіл магнітних втрат у перетині ЛД у робочому режимі: втрати в сталі (шкала 1); втрати в магнітах (шкала 2)

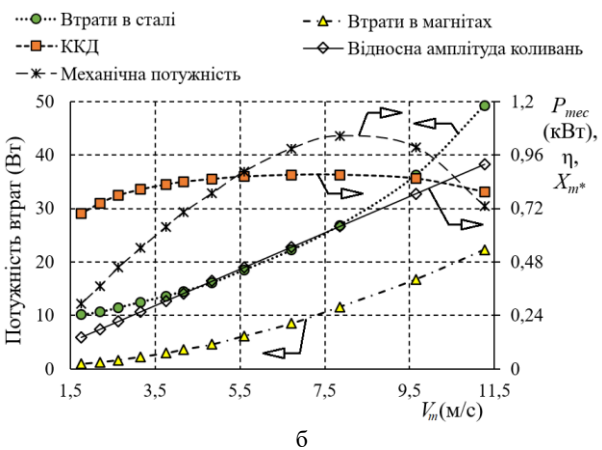
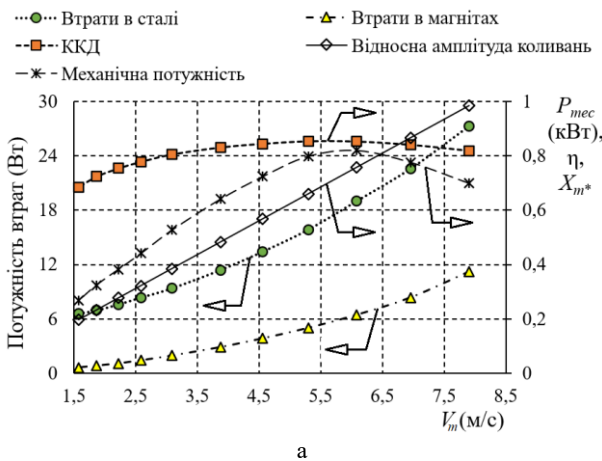


Рис. 6. Залежності втрат: $f=73,1$ Гц (а); $f=111,6$ Гц (б)

Оскільки частота є фіксованою, швидкість бігуна зменшується пропорційно до амплітуди коливань. У режимі невеликого навантаження відбувається суттєве зростання магнітних втрат як у сталі, так і в постійних магнітах. Тому такий режим не може бути рекомендований як тривалий, через ризик перегріву машини, а особливо магнітів, властивості яких істотно залежать від температури. Потужність втрат зі зростанням навантаження наближається до втрат короткого замикання,

що спричинені тільки зміною МРС обмотки статора, амплітуда якої під час дослідів не змінюється.

ККД машини η тут визначається як відношення механічної потужності до сумарної потужності, що обчислюється як сума механічної та потужностей втрат. Тобто в цьому разі не враховуються механічні втрати від тертя в підшипниках, направляючих, пружинах тощо. Крива ККД за умови фіксованої частоти має максимум, що залежить від механічних та електричних параметрів ЛД, потужності втрат, а також від частоти [21].

Як свідчать розрахунки, потужність магнітних втрат суттєво залежить від швидкості бігуна, тоді як вплив робочої частоти значно менший. На рис. 7 показано криві питомих магнітних втрат ($Вт/м^3$) окремо для сталі та постійних магнітів, отримані за допомогою перерахунку результатів представлених вище. Також тут показано залежність сумарних питомих магнітних втрат (у сталі та в магнітах) від частоти для режиму короткого замикання (крива «Втрати КЗ»), коли бігун є нерухомим.

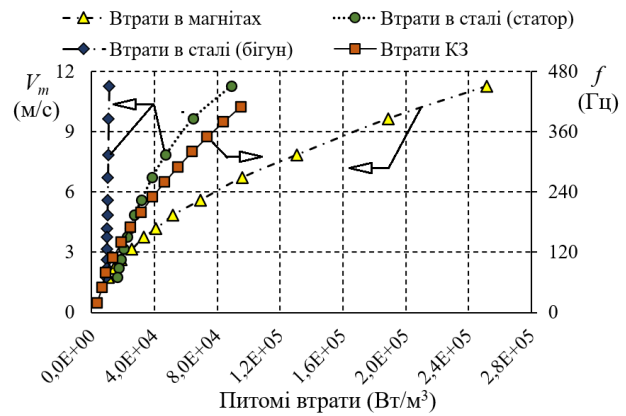


Рис. 7. Питоми втрати

Як свідчать наведені результати, за умови невеликих амплітуд механічних коливань робоча частота двигуна може бути досить висока (до 0,5 кГц). Водночас навіть на невеликих частотах коливань, за умови значних швидкостей руху, втрати в постійних магнітах можуть бути суттєві. Це вимагає обов'язкового застосування заходів щодо їх зниження.

Висновки. Інтенсивність магнітних втрат вібраційного лінійного двигуна з рухомими магнітами суттєво залежить від його режиму роботи і зменшується зі збільшенням навантаження через зменшення амплітуди коливань та швидкості бігуна. Основна частка втрат концентрується в кутових зонах магнітопроводів та постійних магнітів наближених до повітряного проміжку.

Більша частина втрат у сталі розсіюється в статорі, тоді як у бігуні втрати невеликі й майже не залежать від швидкості. Це дає можливість застосовувати товщу сталі, або виготовляти суцільні полюси для здешевлення конструкції.

У режимі невеликого навантаження відбувається суттєве зростання магнітних втрат як у сталі, так і в постійних магнітах. Тому такий режим не може бути рекомендований як тривалий, через ризик перегріву

машини, а особливо магнітів, властивості яких суттєво залежать від температури. Потужність втрат зі зростанням навантаження наближається до втрат короткого замикання, що спричинені тільки зміною МРС обмотки статора.

Як свідчать отримані результати, для невеликих амплітуд механічних коливань робоча частота двигуна може бути досить висока (до 0,5 кГц). Водночас навіть на невеликих частотах коливань, за умови значних швидкостей руху, втрати в постійних магнітах можуть бути суттєві. Це вимагає обов'язкового застосування заходів щодо їх зниження.

Список літератури

- Gurskyi V., Korendiy V., Krot P., Dyshev O. Determination of kinematic and dynamic characteristics of a reversible vibratory conveyor with an electromagnetic drive. *Vibroengineering Procedia*. 2024. Vol. 55. P. 138–144. <http://dx.doi.org/10.21595/vp.2024.24403>.
- Bondar R. P. Control system of a vibrating platform driven by a permanent magnet linear motor. *Технічна електродинаміка*. 2025. № 6. С. 44–51. <https://doi.org/10.15407/techned2025.06.044>.
- Ahamed R., McKee K., Howard I. A review of the linear generator type of wave energy converters' power take-off systems. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(16): 9936. <https://doi.org/10.3390/su14169936>.
- Waindok A., Tomczuk B. Field analysis and eddy current losses calculation in five-phase tubular actuator. *Open Physics*. 2017. Vol. 15, no. 1. P. 897–901. <https://doi.org/10.1515/phys-2017-0107>.
- Mohammed A. M., Galea M., Cox T., Gerada C. Consideration on eddy current reduction techniques for solid materials used in unconventional magnetic circuits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 66, no. 6. P. 4870–4879. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2875641>.
- Hu Y., Xu Z., Yang L., Liu L. Electromagnetic loss analysis of a linear motor system designed for a free-piston engine generator. *Electronics*. 2020. Vol. 9(4): 621. <https://doi.org/10.3390/electronics9040621>.
- Olejnik P., Desta Y., Mydlowski M. Magnetic field distribution and energy losses in a permanent magnet linear synchronous motor under stick-slip friction. *Energies*. 2025. Vol. 18(1): 191. <https://doi.org/10.3390/en18010191>.
- Abdalla I., Ibrahim T., Perumal N., Nursyarizal N. Minimization of eddy-current loss in a permanent-magnet tubular linear motor. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2017. Vol. 7, no. 3. P. 964–970. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.3.2280>.
- Steinmetz C. P. On the law of hysteresis. *Proceedings of the IEEE*. 1984. Vol. 72, no. 2. P. 197–221. <https://doi.org/10.1109/PROC.1984.12842>.
- Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1988. Vol. 24, no. 1. P. 621–630. <https://doi.org/10.1109/20.43994>.
- Grebenikov V., Podoltsev O., Tazhibayev A., Arynov N., Sakhno O. Calculation of magnetic losses and energy efficiency of a magnetic gearbox with a modulated magnetic field. *Відновлювальна енергетика*. 2025. № 1(80). С. 92–99. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).92-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).92-99).
- Mihic D. S., Terzic M. V., Koprivica Z. V. Non-linear model of the switched reluctance motor with included core losses' effects. *IET Electric Power Applications*. 2021. Vol. 15(11). P. 1466–1478. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12114>.
- Ciriani C., Khan H., Mansour K., Olivo M., Tessarolo A. Simple and accurate computation of rotor eddy-current losses in surface-mounted permanent magnet machines accounting for magnet circumferential segmentation. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 36810–36824. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3374214>.
- Бондар Р. П. Оптимізаційний підхід до визначення конструктивних параметрів лінійного магнітоелектричного двигуна вібраційної дії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.033>.
- Бондар Р., Голенков Г., Бондар О. Стратегія керування трифазним вібраційним лінійним двигуном на основі оцінки зворотної електрорушійної сили. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. Харків, 2025. № 2(14). С. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.2.06>.
- Hargreaves P., Mecrow B. C., Hall R. Calculation of iron loss in electrical generators using finite element analysis. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. 2011. P. 1368–1373 DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2011.5994805>.
- Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике: монография. Киев: ИЭД НАНУ, 2015. 304 с.
- ДСТУ EN 10106:2022 (EN 10106:2015, IDT). Холоднокатана неорієнтована електротехнічна смуга та лист, що постачають у повністю обробленому стані. [Чинний від 2023-31-12]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2022. 23 с.
- <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
- Novak G., Kokosar J., Bricelj M., Bizjak M., Steiner P., Nagode A. Improved model based on the modified Steinmetz equation for predicting the magnetic losses in non-oriented electrical steels that is valid for elevated temperatures and frequencies. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017. Vol. 53, no. 10. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2726500>.
- Bondar R. P. Resonant modes of a linear permanent magnet vibratory motor. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 4. С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.028>.

References (transliterated):

- Gurskyi V., Korendiy V., Krot P., Dyshev O. Determination of kinematic and dynamic characteristics of a reversible vibratory conveyor with an electromagnetic drive. *Vibroengineering Procedia*. 2024. Vol. 55. P. 138–144. <http://dx.doi.org/10.21595/vp.2024.24403>.
- Bondar R. P. Control system of a vibrating platform driven by a permanent magnet linear motor. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2025. No 6. P. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.06.044>.
- Ahamed R., McKee K., Howard I. A review of the linear generator type of wave energy converters' power take-off systems. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(16): 9936. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14169936>.
- Waindok A., Tomczuk B. Field analysis and eddy current losses calculation in five-phase tubular actuator. *Open Physics*. 2017. Vol. 15, no. 1. P. 897–901. DOI: <https://doi.org/10.1515/phys-2017-0107>.
- Mohammed A. M., Galea M., Cox T., Gerada C. Consideration on eddy current reduction techniques for solid materials used in unconventional magnetic circuits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 66, no. 6. P. 4870–4879. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2875641>.
- Hu Y., Xu Z., Yang L., Liu L. Electromagnetic loss analysis of a linear motor system designed for a free-piston engine generator. *Electronics*. 2020. Vol. 9(4): 621. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9040621>.
- Olejnik P., Desta Y., Mydlowski M. Magnetic field distribution and energy losses in a permanent magnet linear synchronous motor under stick-slip friction. *Energies*. 2025. Vol. 18(1): 191. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18010191>.
- Abdalla I., Ibrahim T., Perumal N., Nursyarizal N. Minimization of eddy-current loss in a permanent-magnet tubular linear motor. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2017. Vol. 7, no. 3. P. 964–970. DOI: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.3.2280>.
- Steinmetz C. P. On the law of hysteresis. *Proceedings of the IEEE*. 1984. Vol. 72, no. 2. P. 197–221. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1984.12842>.
- Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1988. Vol. 24, no. 1. P. 621–630. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.43994>.
- Grebenikov V., Podoltsev O., Tazhibayev A., Arynov N., Sakhno O. Calculation of magnetic losses and energy efficiency of a magnetic gearbox with a modulated magnetic field. *Vidnovluyana Energetika*. 2025. Vol. 1(80). P. 92–99. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).92-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).92-99).
- Mihic D. S., Terzic M. V., Koprivica Z. V. Non-linear model of the switched reluctance motor with included core losses' effects. *IET Electric Power Applications*. 2021. Vol. 15(11). P. 1466–1478. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12114>.
- Ciriani C., Khan H., Mansour K., Olivo M., Tessarolo A. Simple and accurate computation of rotor eddy-current losses in surface-mounted permanent magnet machines accounting for magnet circumferential segmentation. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 36810–36824. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3374214>.
- Бондар Р. П. Оптимізаційний підхід до визначення конструктивних параметрів лінійного магнітоелектричного двигуна вібраційної дії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.033>.
- Бондар Р., Голенков Г., Бондар О. Стратегія керування трифазним вібраційним лінійним двигуном на основі оцінки зворотної електрорушійної сили. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, № 1 (15) 2026

13. Ciriani C., Khan H., Mansour K., Olivo M., Tessarolo A. Simple and accurate computation of rotor eddy-current losses in surface-mounted permanent magnet machines accounting for magnet circumferential segmentation. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 36810–36824. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3374214>.
14. Bondar R. P. Optymizatsiyni pidkhdid do vyznachennia konstruktyvnykh parametriv liniinoho mahnitoelektrychnoho dvyhuna vibratsiinoi dii. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No. 1. P. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.033>.
15. Bondar R., Holenkov H., Bondar O. Stratehiia keruvannia tryfaznym vibratsiynym liniinym dvyhunom na osnovi otsinky zvorotnoi elektrorushiinoi syly. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Problemy udoskonalyvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka*. Kharkiv, 2025. Vol. 2(14). P. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.2.06>.
16. Hargreaves P., Mecrow B. C., Hall R. Calculation of iron loss in electrical generators using finite element analysis. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. 2011. P. 1368–1373 DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2011.5994805>.
17. Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N. Multyfyzycheskoe modelyrovanye v elektrotekhnike: a monograph. Kiev: Ukrainian National academy of sciences institute of electrodynamics. 2015. 304 p.
18. DSTU EN 10106:2022 (EN 10106:2015, IDT). Kholodnokatana neorijentovana elektrotekhnichna smuha ta lyst, shcho postachaiut u povnistiu obroblenomu stani. [Valid from 2023-31-12]. Official publication Kyiv: UkrNDNTS, 2022. 23 p.
19. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
20. Novak G., Kokosar J., Bricelj M., Bizjak M., Steiner P., Nagode A. Improved model based on the modified Steinmetz equation for predicting the magnetic losses in non-oriented electrical steels that is valid for elevated temperatures and frequencies. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017. Vol. 53, no. 10. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2726500>.
21. Bondar R. P. Resonant modes of a linear permanent magnet vibratory motor. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No. 4. P. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.028>.

Надійшла (Received) 15.01.2026

Прийнята (Accepted) 28.01.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

Бондар Роман Петрович (Bondar Roman Petrovych) – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри електротехніки та електроприводу; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0198-5548>; e-mail: bondar.rp@knuba.edu.ua.