

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ НАВАНТАЖЕННЯ ЛІНІЙНОЇ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІЇ

¹Київський національний університет будівництва і архітектури

Розглянуто магнітоелектричну лінійну машину циліндричної топології, що використовується як навантажувальна машина під час експериментальних досліджень електромеханічних характеристик лінійних двигунів вібраційної дії. Конструкція машини містить постійний магніт, розміщений на статорі, і намагнічений в аксіальному напрямку. Якір машини виконаний масивним, з конструкційної низькоуглецевої сталі, що спричиняє вихрові струми в осерді машини та відповідні втрати. Для їх врахування, а також для визначення параметрів навантажувальної машини, розроблено числову польову модель, яка ґрунтується на розв'язанні рівнянь електромагнітного поля в часовій області. Внаслідок осьової симетрії машини, задачу розв'язано в вісесиметричній постановці, в циліндричній системі координат. Розрахунок проведено з використанням методу скінченних елементів. Характеристику намагнічування матеріалу магнітопроводу моделі задано у вигляді основної кривої намагнічування. Значення електромагнітної сили машини визначено за формулою Максвелла. Задача розв'язується за умови рухомої сітки в області якоря. Синусоїдна аналітична функція застосована до рухомої частини сітки для моделювання коливання якоря із заданою амплітудою та частотою. Для повнішого врахування ефекту вихрових струмів на зовнішніх границях області якоря застосовано спеціальний тип сітки з граничними шарами. Товщину шарів задано відповідно до частоти індукованих струмів. Силову характеристику навантажувальної машини подано сумою пружної складової, пропорційної до переміщення якоря, та сили в'язкого тертя, пропорційної до швидкості. Для розрахунку коефіцієнтів навантаження машини, використано метод динамічної петлі гістерезису. Проведено експериментальні дослідження параметрів навантаження за допомогою дослідного зразка навантажувальної машини. Експериментальні значення коефіцієнтів жорсткості та в'язкого тертя навантажувальної машини отримані за допомогою методу згасальних коливань.

Ключові слова: магнітоелектрична лінійна машина, метод скінченних елементів, навантажувальна машина, параметри навантаження, рухома сітка.

Вступ

Робочі процеси багатьох машин і механізмів передбачають використання вібраційного руху робочого органу. Лінійні машини досить широко використовуються як приводи 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. До переваг лінійних машин відносять відсутність механічних передач, низький рівень шуму, високу надійність та покращену керованість.

Велике значення під час проектування та виготовлення пристроїв з лінійними машинами, має побудова відповідних математичних моделей. Будь-яка модель має обмеження й функціонує в межах прийнятих припущень, що відповідають меті моделювання. Для 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.

Найнадійнішим способом перевірки розробленої моделі є проведення експериментальних досліджень дослідного зразка пристрою. Під час таких досліджень можна оцінити вплив механічних,

електромагнітних чи теплових процесів, що не враховані в математичній моделі. Достовірність отриманих результатів суттєво залежить від досконалості обладнання, вибору експериментальних методик, точності вимірювальних приладів. Для випробувань лінійних машин вібраційної дії, важливим є одночасна ресстрація механічних та електричних величин, як функцій часу.

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

Дослідження характеристик лінійних машин, за допомогою розроблених стендів та методик, розглянуто в роботах [2]—[8]. В роботі [6] запропоновано конструкцію дослідного стенда для випробування лінійних машин вібраційної дії в статичних режимах та проведено експериментальне дослідження характеристик дослідного зразка магнітоелектричної лінійної машини згідно з поданими методиками. У [7] розроблено дослідний стенд для випробувань лінійних машин вібраційної дії в генераторному режимі роботи. Дослідження, проведене у [8], дозволило пов'язати робочі характеристики магнітоелектричного лінійного вібраційного двигуна з параметрами навантаження пружно-в'язкого типу для трьох режимів роботи — для сталого значення струму двигуна та для сталих амплітуди коливань і прискорення якоря. Зазначене дослідження виконано з використанням лінійної навантажувальної машини (НМ), характеристика навантаження якої представлена еквівалентними параметрами — коефіцієнтом жорсткості та коефіцієнтом в'язкого демпфування. Значення останніх, можуть бути отримані розрахунком (зокрема шляхом дослідження магнітного поля НМ в часовій області з урахуванням закону руху якоря), або експериментально, за допомогою дослідного зразка НМ.

Метою роботи є розробка математичної моделі та розрахунок згідно з цією моделлю еквівалентних параметрів пружно-в'язкого навантаження дослідного зразка лінійної навантажувальної машини вібраційної дії.

Конструкція навантажувальної машини

Статор 1 навантажувальної машини (рис. 1а) містить осердя з двома феромагнітними полюсами 2, між якими розміщена обмотка 3. Для покращення питомих силових показників в магнітопроводі статора застосовано постійний магніт 4 тороїдної форми. Електромагнітна сила машини визначається силою та напрямком струму в обмотці, а також положенням феромагнітного якоря 5 відносно статора. Осердя якоря виконане з конструкційної низьковуглецевої сталі. Це спричиняє вихрові струми та відповідні втрати, які мають бути враховані в розрахунковій моделі.

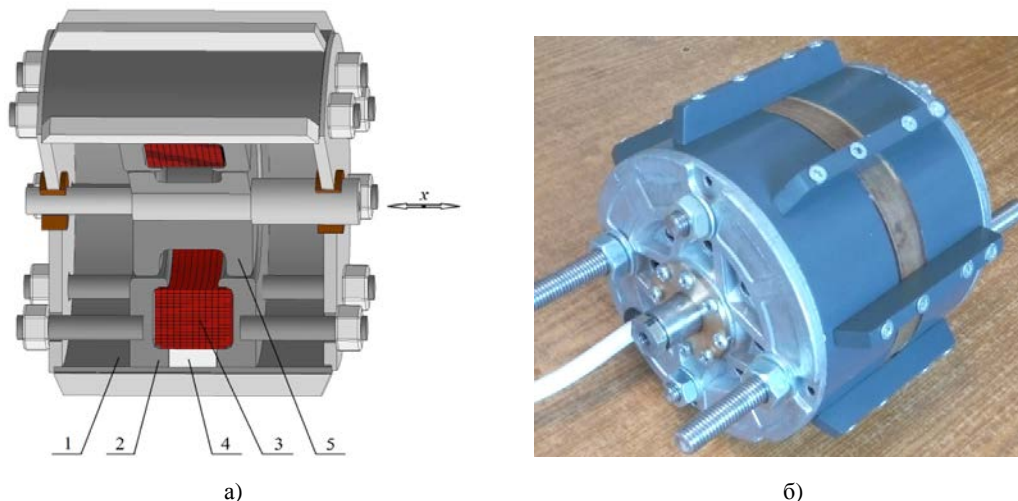


Рис. 1. Дослідна навантажувальна машина: а — будова; б — зовнішній вигляд

Основні конструктивні параметри НМ подано в таблиці.

Розрахунок параметрів навантажувальної машини за допомогою числової польової моделі

Визначення коефіцієнтів навантаження може бути проведено на підставі числового розрахунку магнітного поля методом скінченних елементів із застосуванням рухомого типу розрахункової сітки в області якоря.

Внаслідок осьової симетрії машини (див. рис. 1а), задача розв'язувалась в вісесиметричній постановці з використанням рівнянь електромагнітного поля в часовій області [9].

В циліндричній системі координат векторний потенціал \mathbf{A} має єдину ϕ -компоненту $\mathbf{A} = (0, A_\phi, 0)$. Диференційні рівняння, записані відносно векторного магнітного потенціалу, мають вигляд

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla (\mu_0^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e;$$

$$\mathbf{B} = \nabla \cdot \mathbf{A},$$

де σ — питома електропровідність;

$\nabla = e_r \frac{\partial}{\partial r} + e_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} + e_z \frac{\partial}{\partial z}$ — оператор «на-

бла» (оператор диференціювання), записаний для циліндричної системи координат; e_r, e_ϕ, e_z — орти циліндричної системи координат; \mathbf{J}_e — густина струму в обмотці; \mathbf{B} — магнітна індукція.

Конструктивні параметри навантажувальної машини

Робочі параметри			
Робоча амплітуда коливань		м	0,01
Максимальна амплітуда коливань		м	0,015
Фізичні параметри			
Постійний магніт	матеріал	NdFeB (N42)	
	максимальна енергія $(BH)_{max}$	кДж/м ³	326
	залишкова магнітна індукція	Тл	1,3
Осердя	матеріал	Ст3	
Обмотка	кількість витків	380	
	дріт	ПСД, Ø 1,12	
Основні розміри			
Магніт	діаметр зовнішній	мм	136
	діаметр внутрішній		123
	висота		19
Повітряний проміжок		мм	0,7
Полюсна поділка		мм	36
Габаритні розміри	діаметр	мм	160
	довжина	мм	120

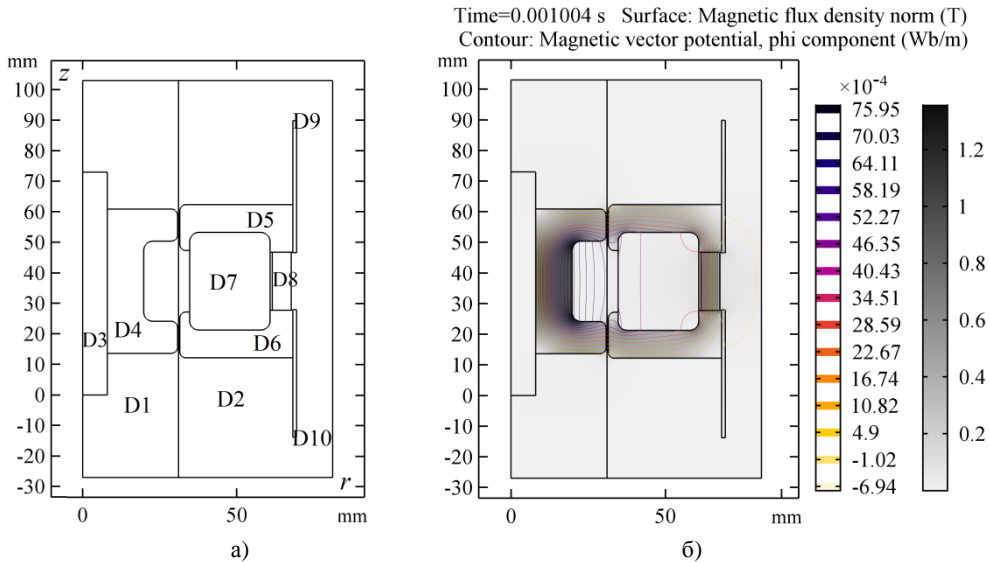


Рис. 2. Полюова модель навантажувальної машини: а — розрахункові області; б — результати розрахунку магнітного поля

Вважалось, що в розрахунковій моделі машини (рис. 2а) властивості матеріалів такі:

– магнітний стан матеріалу магнітопроводів якоря та статора (області D4-D6) визначається відповідно до основної кривої намагнічування сталі, тобто

$$\mathbf{H} = \mu(|\mathbf{B}|)^{-1} \mathbf{B},$$

де \mathbf{H} — напруженість магнітного поля;

– магнітопровід якоря виконаний суцільним (Ст3) з радіальним розрізом для зменшення вихрових струмів. Тому для області D4 задано відповідну провідність — $\sigma_{st} = 6,11 \cdot 10^6$ См/м. Додаткове рівняння для цієї області матиме вигляд

$$\int \mathbf{J}_i ds = 0,$$

де \mathbf{J}_i — густина індукованого струму, а інтегрування здійснюється по області D4.

Вважалось також, що в області обмотки D7 струм рівномірно розподілений по її перетину, і протікає тільки вздовж провідників, які мають провідність $\sigma_{cu} = 5,8 \cdot 10^7$ См/м.

Для матеріалу магніту (область D8) задається рівняння

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_{rem},$$

де \mathbf{B}_{rem} — залишкова магнітна індукція постійного магніту.

Області D1—D3, D9, D10 мають властивості повітря з відповідним рівнянням стану

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}.$$

Як граничні умови задано умову осьової симетрії та умову магнітної ізоляції на зовнішніх границях розрахункової області — $A_\phi = 0$.

Значення електромагнітної сили машини визначалось інтегруванням тензора Максвелла \mathbf{T} по поверхні якоря згідно з виразом

$$\mathbf{F}_l = \int_s 2\pi r \mathbf{n} \mathbf{T} ds,$$

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.

Задача розв'язувалась за умови рухомої сітки в областях D1, D3, D4. Синусоїдна аналітична функція застосовувалась до рухомої частини сітки для моделювання коливання якоря із заданою амплітудою та частотою.

Для точнішого врахування ефекту вихрових струмів на зовнішніх границях області якоря (D4) застосовувався спеціальний тип сітки з граничними шарами. Товщина шарів задається відповідно до частоти індуктованих струмів. Як відомо, глибина скін-шару залежить від частоти, провідності матеріалу, його магнітної проникності й визначається за формулою

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma \pi \mu_0 \mu_r f_i}},$$

де δ — глибина скін-шару, м; σ — провідність матеріалу, См/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м — магнітна стала; μ_r — відносна магнітна проникність; f_i — частота індуктованих струмів, Гц.

Товщина кожного шару визначалась згідно з рівнянням

$$\delta_{lay} = \frac{\delta}{n_{lay}},$$

де n_{lay} — кількість граничних шарів розрахункової сітки (вважалось, що $n_{lay} = 4$).

Результати розрахунку магнітного поля активної зони НМ показано на рис. 2б.

Для розрахунку коефіцієнтів навантаження використовувався метод динамічної петлі гістерезису. Цей метод широко використовується для визначення властивостей демпферів, і зокрема тих, в яких використовується ефект від протікання вихрових струмів [10].

Для демпфованих систем залежність сили від переміщення має вигляд петлі гістерезису. Залежно від властивостей системи, вигляд цієї характеристики може змінюватись. Оскільки робота консервативних сил (в цьому випадку пружних) за повний цикл коливань завжди дорівнює нулю, то розсіювання механічної енергії в системі пов'язано тільки з силами демпфування.

На рис. 3 показано залежності електромагнітної сили від переміщення якоря x протягом одного циклу коливань, отримані за допомогою запропонованої польової моделі за умови сталого значення і напрямку струму НМ. Частота коливань становить $f = 24,9$ Гц, з амплітудою $X_m = 0,01$ м. Площа, обмежена кривою гістерезису, кількісно дорівнює роботі сил демпфування, а середній кут нахилу петлі визначає жорсткість системи.

Визначення роботи сил демпфування можна виконати, використовуючи часові залежності відповідних величин згідно з виразом

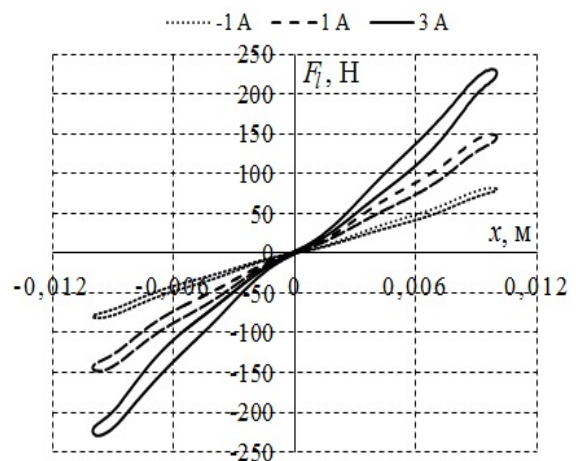


Рис. 3. Розрахункова залежність сили навантажувальної машини від переміщення

$$W_{b_d} = \oint F_l dx = \int_{t-T}^t F_l v dt,$$

де v — миттєве значення швидкості якоря.

Робота еквівалентної лінійної сили в'язкого тертя протягом циклу коливань (для синусоїдної швидкості v) дорівнює

$$W_{b_d} = \int_0^T b_d v^2 dt = b_d \omega X_m^2 \pi,$$

де b_d — еквівалентний коефіцієнт в'язкого тертя, зумовлений дією вихрових струмів; ω , X_m — відповідно кутова частота та амплітуда коливань. Тоді, якщо відома робота, величина b_d визначається з рівняння

$$b_d = \frac{W_{b_d}}{\omega X_m^2 \pi}. \quad (1)$$

Результати розрахунку за рівнянням (1) для різних значень струму навантажувальної машини показано на рис. 4 суцільною лінією. Там же показано розраховану за нахилом петлі гістерезису залежність коефіцієнта жорсткості навантаження k_l .

Відповідно до наведеного вище, силова характеристика навантаження може бути подана сумою пружної складової, пропорційної до переміщення якоря НМ x , та сили в'язкого тертя, пропорційної швидкості v , тобто

$$F_l = k_l x + b_l v, \quad (2)$$

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

Як свідчить проведений за допомогою запропонованої числової польової моделі аналіз, значення електромагнітної сили НП зростає зі зменшенням ширини (осьового розміру) осердя якоря, що пояснюється зростанням магнітного поля зі зменшенням об'єму магнітопроводу. Проте в такому випадку, збільшується нелінійність силової характеристики пристрою. Тому вибрані в цій конструкції розміри є компромісними, тобто такими, що забезпечують достатнє значення сили, та її незначну нелінійність в залежності від переміщення якоря.

Коефіцієнт демпфування НМ, визначений за результатами польового розрахунку, враховує дію вихрових струмів, і не враховує механічні сили тертя. Останні мають випадковий характер (ексцентриситет якоря, змащування тощо) і залежать від конструктивного виконання машини й тому, в цьому розрахунку не визначаються. Для визначення обох складових, проводилось експериментальне дослідження за допомогою дослідного зразка НМ (див. рис. 1б) з конструктивними параметрами, поданими в таблиці.

Експериментальне дослідження параметрів навантажувальної машини

Експериментальне визначення параметрів навантаження проводилось із застосуванням методу згасаючих коливань [11]. Дослід проводився згідно наступної процедури.

В обмотці НМ встановлювалось задане значення струму (в діапазоні 2...3,5 А), яке під час досліду підтримувалось сталим за допомогою регулятора струму. Потім якір НМ штучно виводився з положення механічної рівноваги, і раптово звільнявся. Частота вільних коливань та характер їх затухання є вихідними даними для розрахунку відповідних коефіцієнтів. Прискорення якоря вимірювалось за допомогою акселерометра. Оцінка резонансних властивостей здійснювалась згідно отриманого спектру затухаючого сигналу. Зазначений спосіб дозволяє уникнути операції інтегрування експериментального сигналу, та пов'язаних з цим обчислювальних похибок.

Проведення такого досліду для двох різних мас (для другого досліду до якоря приєднується додаткова наперед відома маса) дозволяє розрахувати коефіцієнти жорсткості k_l та демпфування b_l , а також масу якоря та, за наявності, приєднану масу пружної підвіски (коливальну масу). Кожна пара дослідів виконувалась для різних значень струму обмотки НМ.

На рис. 4 маркером показано експериментальні залежності коефіцієнтів k_l та b_l від струму навантажувальної машини I_l .

Як видно з отриманих даних, коефіцієнт жорсткості k_f має близьку до лінійної залежність від струму. Деяка нелінійність проявляється за від'ємних значень струму, коли напрям МРС обмотки є протилежним напрямку МРС постійного магніту.

Значення коефіцієнта демпфування зростає зі збільшенням струму навантажувальної машини. Цей коефіцієнт, як зазначалось вище, зумовлений двома складовими: перша має механічну природу і пов'язана з силами тертя в напрямних якоря, друга — пов'язана з дією сил, зумовлених протіканням вихрових струмів в осерді машини. Обидві мають схильність до зростання зі збільшенням струму навантаження. Це пояснюється, по-перше, зростанням радіальних електромагнітних сил та, як наслідок, сили тертя в напрямних якоря, по-друге, посиленням впливу вихрових струмів внаслідок збільшення інтенсивності магнітного поля.

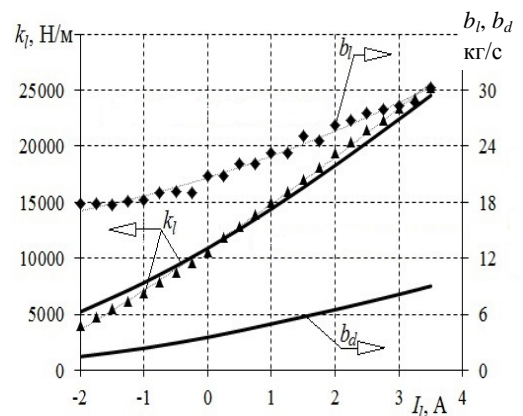


Рис. 4. Залежність параметрів навантаження від струму

Висновки

Запропонована числова польова модель лінійної навантажувальної машини вібраційної дії дозволяє виконати розрахунок еквівалентних параметрів пружно-в'язкого навантаження за відомими геометричними параметрами активної зони машини.

Результати розрахунку, проведеного за допомогою моделі, свідчать, що значення коефіцієнта демпфування зростає зі збільшенням струму навантажувальної машини. Зазначений коефіцієнт враховує дві складові: перша має механічну природу і пов'язана з силами тертя в напрямних якоря, друга — пов'язана з дією сил, зумовлених вихровими струмами в осерді машини. Обидві мають схильність до зростання зі збільшенням струму навантаження. Це пояснюється, по-перше, зростанням радіальних електромагнітних сил та, як наслідок, сили тертя в напрямних якоря, по-друге, посиленням впливу вихрових струмів внаслідок збільшення інтенсивності магнітного поля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] I. Boldea, and A. N. Syed, *Linear Electric Actuators and Generators*. Cambridge University Press, 2005.
- [2] Г. М. Голенков, та Д. І. Пархоменко, «Електромеханічні тягові характеристики коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами та магнітним підвісом», *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 56-59, 2014.
- [3] Г. М. Голенков, и Мохсен Аббасян, «Электромеханические характеристики коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов», *Технічна електродинаміка*, № 3, с. 64-69, 2014.
- [4] В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, С. В. Олексенко, и И. С. Щукин, «Методика экспериментальных исследований линейных импульсных электромеханических преобразователей», *Електротехніка і електромеханіка*, № 2, с. 18-27, 2017. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.03>.
- [5] A. R. Palomera, "Passive electromagnetic damping device for motion control of building structures." PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [6] Р. П. Бондар, «Експериментальне визначення параметрів та дослідження характеристик лінійної машини вібраційної дії», *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*, № 91, с. 36-43, 2018. <https://doi.org/10.26884/gbdmm1891.0302>.
- [7] Р. П. Бондар, «Дослідження характеристик лінійної вібраційної машини в генераторному режимі», in *Proceedings of international scientific-practical conference «BUILD-MASTER-CLASS-2018*, Kyiv, Ukraine, 2018, pp. 328-329.
- [8] Р. П. Бондар, «Дослідження характеристик магнітоелектричного лінійного вібраційного двигуна при роботі на пружно-в'язке навантаження», *Електротехніка і електромеханіка*, № 1, с. 9-16, 2019. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.1.02>.
- [9] А. Д. Подольцев, и И. Н. Кучерявая, *Мультифизическое моделирование в электротехнике*. Киев, Украина: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015.
- [10] Qiang Pan, Tian He, Denghong Xiao, and Xiandong Liu, "Design and damping analysis of a new eddy current damper for aerospace applications," *Latin American Journal of Solids and Structures*, no. 13, pp. 1997-2011, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78252272>.
- [11] C. W. de Silva, *Vibration and Shock Handbook*, CRC Press, 2005.

Бондар Роман Петрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електроприводу, e-mail: rpbondar@gmail.com .

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

R. P. Bondar¹

Determination of Loading Equivalent Parameters of the Linear Permanent Magnet Vibratory Machine

¹Kyiv National University of Construction and Architecture

The permanent magnet linear tubular machine which is used as the loading machine at experimental studies of electro-mechanical characteristics of vibratory linear motors is considered. The machine design contains the permanent magnet placed on the machine stator, and magnetized in the axial direction. The anchor of the machine is made solid of constructional low-carbon steel that is cause of eddy currents and availability of the corresponding losses. For their taking into account, and also for calculation of parameters of the load machine, the field model which is based on the solution of the equations of an electromagnetic field in a time domain has been developed. Owing to axial symmetry of the machine, the problem was solved in axisymmetric approach, in cylindrical coordinate system. Calculation is carried out with use of a finite element method. The characteristic of magnetization of a magnetic core material is set in the model in the form of the BH curve. Value of the machine electromagnetic force is calculated with the help of Maxwell's formula. The problem is solved on condition of a moving mesh in the anchor domain. Sinusoidal analytical function was applied to moving part of a grid to modeling of oscillations of an anchor with the specified amplitude and frequency. For more accurate calculation of eddy current effect on external borders of anchor domain, the special type of a grid with boundary layers was applied. Thickness of the layers is set according to the frequency of induced currents. The force characteristic of the loading machine is provided by the sum of an elastic component which is proportional to the anchor movement, and viscous friction force, which is proportional to a speed. For calculation of loading machine coefficients, the dynamic hysteresis loop method was used. Experimental studies of the loading parameters by means of testing prototype the loading machine had been conducted. Experimental values of stiffness and viscous friction coefficients of the loading machine are received by means of a step-response method.

Keywords: finite element method, linear permanent magnet machine, loading machine, loading parameters, moving mesh.

Bondar Roman P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering and Electric Drive, e-mail: rpbondar@gmail.com

Р. П. Бондар¹

Определение эквивалентных параметров нагрузки линейной магнитоэлектрической машины вибрационного действия

¹Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Рассмотрена магнитоэлектрическая линейная машина цилиндрической топологии, которая используется в качестве нагрузочной машины, при экспериментальных исследованиях электромеханических характеристик линейных двигателей вибрационного действия. Конструкция машины содержит постоянный магнит, размещенный на статоре, и намагниченный в аксиальном направлении. Якорь машины выполнен массивным, из конструкционной низкоуглеродистой стали, что вызывает протекание вихревых токов и соответствующие потери. Для их учета, а также для расчета параметров нагрузочной машины, была разработана полевая модель, которая основана на решении уравнений электромагнитного поля во временной области. Вследствие осевой симметрии машины, задача решалась в осесимметричной постановке, в цилиндрической системе координат. Расчет выполняется с использованием метода конечных элементов. Характеристика намагничивания материала магнитопровода модели задается в виде основной кривой намагничивания. Значение электромагнитной силы машины определяется по формуле Максвелла. Задача решается при условии движущейся сетки в области якоря. Синусоидальная аналитическая функция применялась к подвижной части сетки для моделирования колебаний якоря с заданной амплитудой и частотой. Для более точного учета эффекта вихревых токов, на внешних границах области якоря применялся специальный тип сетки с граничными слоями. Толщина слоев задается в соответствии с частотой индуцированных токов. Силовая характеристика нагрузочной машины представлена суммой упругой составляющей, пропорциональной перемещению якоря, и силы вязкого трения, пропорциональной скорости. Для расчета коэффициентов нагрузки машины, использовался метод динамической петли гистерезиса. Проведены экспериментальные исследования параметров нагрузки с помощью опытного образца нагрузочной машины. Экспериментальные значения коэффициентов жесткости и вязкого трения нагрузочной машины получены с помощью метода затухающих колебаний.

Ключевые слова: движущаяся сетка, магнитоэлектрическая линейная машина, метод конечных элементов, нагрузочная машина, параметры нагрузки.

Бондар Роман Петрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электропривода, e-mail: rpbondar@gmail.com