

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАСТУПНОЇ СХЕМИ ЛІНІЙНОГО МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ВІБРАТОРА

Роман Бондар

Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський пр-т, 31, 03680, Київ, Україна, e-mail: rpbondar@gmail.com, ID: orcid.org/0000-0002-0198-5548

DEFINITION OF PARAMETERS OF AN EQUIVALENT CIRCUIT OF THE LINEAR ELECTRODYNAMIC VIBRATOR

Roman Bondar

Kyiv National University of Construction and Architecture,
31, Povitroflotsky Ave., 03680, Kyiv, Ukraine, e-mail: rpbondar@gmail.com, ID: orcid.org/0000-0002-0198-5548

АНОТАЦІЯ. Розглянуто вібратор з приводом від лінійного магнітоелектричного двигуна та запропоновано його електричну заступну схему. Механічну частину пристрою подано у вигляді відповідних електричних опорів, використовуючи метод електромеханічних аналогій. Згідно наведеної заступної схеми, виконано розрахунок електромеханічних параметрів дослідного зразка магнітоелектричного вібратора. Відповідні значення параметрів визначались на підставі чисельного розрахунку магнітного поля методом скінченних елементів.

Ключові слова: вібратор, електромагнітні параметри, електромеханічні характеристики, лінійний двигун, постійні магніти.

АННОТАЦИЯ. Рассмотрен вибратор с приводом от линейного магнитоэлектрического двигателя и предложена его схема замещения. Механическая часть устройства представлена в виде соответствующих электрических сопротивлений, используя метод электромеханических аналогий. Согласно представленной схеме замещения, выполнен расчет электромеханических параметров опытного образца магнитоэлектрического вибратора. Соответствующие значения параметров определялись на основании численного расчета с помощью метода конечных элементов.

Ключевые слова: вибратор, электромагнитные параметры, электромеханические характеристики, линейный двигатель, постоянные магниты.

ABSTRACT. Purpose. The goal is definition of parameters of an equivalent circuit of the linear electrodynamic vibrator. **Methodology/approach.** Results of theoretical researches are grounded on a circuit model of the linear electrodynamic vibrator. Numerical calculations of the parameters are gained using finite element software. The mechanical part of the device is presented in the form of corresponding electric resistances, using a method of electromechanical analogies. **Findings.** According to the presented equivalent circuit, calculation of electromechanical parameters of a prototype model of the electrodynamic vibrator is given. Corresponding values of parameters were defined on the basis of numerical calculation by means of a finite element method. Experimental researches of the electromechanical parameters of the device are executed. **Research limitations/implications.** The present study provides a starting point for further research of the influence of electrodynamic vibrator parameters on its electromechanical characteristics. **Originality/value.** The parameters calculated by means of presented model, can be used for calculation of characteristics of the vibrator in steady and transitive operating conditions.

Key words: vibrator, electromagnetic parameters, electromechanical characteristics, linear motor, permanent magnets.

ВСТУП

Магнітоелектричні вібраційні пристрої широко використовуються у випробувальних та калібрувальних стендах, в підвісках автомобілів [1], віброізоляційних платформах [2] тощо.

Порівняно з іншими типами віброзбудувачів (гідравлічними, пневматичними, інерційними, електромагнітними) магнітоелектричні вібратори (МЕВ) мають певні

переваги внаслідок широкого частотного діапазону роботи, відносно невеликої потужності споживання енергії та хороших питомих показників електромагнітної сили [3]. Такі вібраційні пристрої відрізняються значною амплітудою коливань і виробляються в широкому діапазоні потужностей, від мікромашин до потужних віброзбудувачів з силою 50 кН та типовим діапазоном робочої частоти 5 ... 3000 Гц [4].

Однак, проектування МЕВ ускладнене наявністю нелінійних ефектів, які суттєво

впливають на робочі характеристики та динаміку пристрою.

Розрахункам параметрів та характеристик магнітоелектричних вібраторів присвячено низку праць. На сьогодні найбільш ефективним шляхом отримання електромагнітних параметрів електричних машин є створення відповідних чисельних польових моделей [5]. У випадку проектування лінійних машин, що мають, як правило, складну конфігурацію магнітного кола, таке моделювання є найбільш прийнятним, оскільки дозволяє врахувати суттєву їх нелінійність. Такий підхід також забезпечує підвищення точності розрахунку та врахування багатьох критичних параметрів, пов'язаних з електричними процесами (нагрівання, механічні напруги тощо) оскільки сучасні системи проектування мають можливість одночасного вирішення кількох міждисциплінарних задач [6].

Метою даної роботи є визначення параметрів елементів заступної схеми магнітоелектричного вібратора та дослідження їх впливу на динаміку пристрою.

Для досягнення цієї мети вирішувались наступні задачі.

Запропоновано заступну схему магнітоелектричного вібратора. Механічну частину пристрою подано у вигляді відповідних електричних опорів, використовуючи метод електромеханічних аналогій.

Розроблено чисельну польову модель МЕВ, за допомогою якої проведено розрахунок параметрів заступної схеми.

В подальшому значення параметрів заступної схеми можуть використовуватись для розрахунку робочих характеристик МЕВ в усталених та перехідних режимах роботи під час їх проектування.

БУДОВА МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ВІБРАТОРА

Конструктивні особливості МЕВ визначаються діапазоном його робочої частоти, потужністю, амплітудою коливань та призначенням. Так, вібратори, що працюють в низькочастотному діапазоні (< 100 Гц), як правило мають масивну рухома частину, на

якій розміщені постійні магніти з радіальним чи аксіальним напрямком намагнічування, а також можуть мати феромагнітні полюси [3]. Як пружні елементи в потужних машинах застосовують циліндричні сталеві або пневматичні пружини.

Вібраційні перетворювачі, які застосовуються для зменшення вібрацій, мають аналогічну конструкцію й відрізняються алгоритмами керування [7, 8, 12].

Типова будова МЕВ, призначеного для утворення вібраційних навантажень в частотному діапазоні $0 \dots 2000$ Гц, показана на рис. 1.

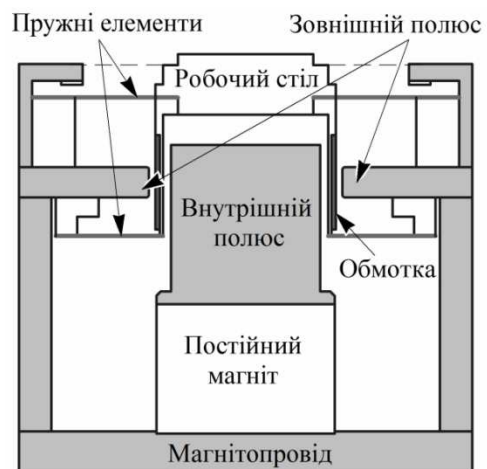


Рис. 1. Магнітоелектричний вібратор

Fig. 1. Electrodynamic vibrator

Для перевірки вірогідності розрахованих значень параметрів проводились експериментальні дослідження за допомогою дослідного зразка МЕВ, основні робочі та фізичні параметри якого наведено в табл.

Під дією струму, який протікає через обмотку вібратора, виникає електромагнітна сила, що діє вздовж осі обмотки та, в залежності від напрямку струму, зумовлює відповідне переміщення прикріпленого до обмотки робочого столу. Пружні елементи вібратора в сукупності з рухома частиною утворюють коливальну систему, що має чітко виражені резонансні властивості [9]. Таким чином, рухома частина здійснює коливальний рух в аксіальному напрямку з частотою струму джерела живлення й амплітудою, що визначається значеннями електромагнітної сили та механічних параметрів МЕВ.

Таблиця. Робочі параметри дослідного зразка МЕВ

Table. Operating parameters prototype MEV

Робоча частота		Гц	0-2000
Максимальна амплітуда коливань		м	0,005
Амплітуда електромагнітної сили		Н	20
Фізичні параметри			
Постійний магніт	Матеріал	NdFeB (N42)	
	Максимальна енергія $(BH)_{max}$	кДж/м ³	326
	Залишкова магнітна індукція	Тл	1,3
	Маса	кг	0,445
Осердя	Матеріал	Ст3	
Обмотка	Кількість витків	90	
	Дріт	ПЭВ-1, Ø0,4	
Підвіска	Жорсткість	Н/м	3600
Основні розміри			
Магніт	Діаметр	мм	50
	Висота		30
Габаритні розміри	Діаметр	мм	114
	Висота		105

ЕКВІВАЛЕНТНА МЕХАНІЧНА МОДЕЛЬ

Механічна частина вібратора представлена двома основними елементами – рухомою котушкою з прикріпленням до неї робочим столом та нерухомим корпусом (рис. 2, а). На рухому частину з масою m_a діють електромагнітна сила F_e , відновлювальна сила пружних елементів з коефіцієнтом пружності k та сила в'язкого тертя з коефіцієнтом b .

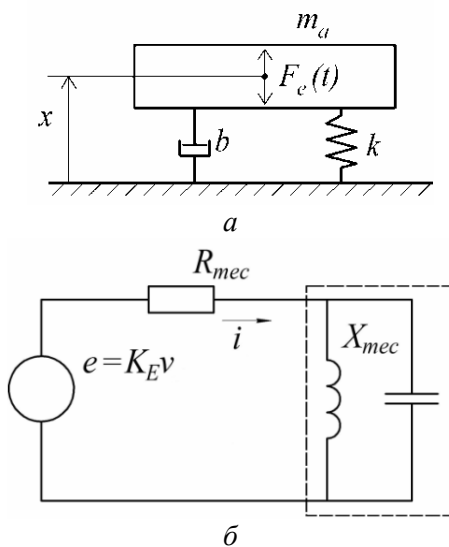


Рис. 2. Механічна схема вібратора (а) та її електричний аналог (б)

Fig. 2. Mechanical scheme of the vibrator (а) and its electromechanical analogue (б)

Рівняння рівноваги сил відповідно до поданої механічної схеми має вигляд

$$\left. \begin{aligned} m_a \frac{d^2x}{dt^2} &= F_e - kx - b \frac{dx}{dt}; \\ v &= \frac{dx}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де x, v – зміщення рухомої частини відносно положення механічної рівноваги та її швидкість відповідно.

Коли обмотка рухається в магнітному полі в ній виникає ЕРС, представлена в моделі джерелом e , яка пропорційна швидкості руху і може бути подана у вигляді падіння напруги на механічному опорі системи (рис. 2, б). Тоді, як витикає зі схеми, активний механічний опір R_{mec} визначатиме «активну» (механічну) потужність системи $P_{mec} = I^2 R_{mec} = VF_e \cos \theta^*$ (де θ^* – кут фазового зсуву між електромагнітною силою F_e та швидкістю V), а повний механічний опір – швидкість та переміщення.

Для синусоїдної електромагнітної сили залежності опорів від частоти та механічних параметрів системи були отримані в [9] і мають вигляд:

– активна складова механічного опору

$$R_{mec} = \frac{K_E K_F b \omega^2}{(k - m_a \omega^2)^2 + b^2 \omega^2}; \quad (2)$$

– реактивна складова механічного опору

$$X_{mec} = \frac{\omega K_E K_F (k - m_a \omega^2)}{(k - m_a \omega^2)^2 + b^2 \omega^2}, \quad (3)$$

де K_E – коефіцієнт ЕРС; K_F – коефіцієнт електромагнітної сили; ω – кутова частота коливань.

Реактивний механічний опір в залежності від частоти має індуктивний (коли $\omega < \omega_0$) або ємнісний характер (коли $\omega > \omega_0$) [9], де $\omega_0 = \sqrt{k/m_a}$ – власна частота коливань механічної системи.

Параметри, що входять до складу наведених рівнянь (коефіцієнт пружності k , коефіцієнт в'язкого тертя b та маса рухомої частини m_a), в загальному випадку є невідомими і мають бути визначені.

Для експериментального отримання зазначених коефіцієнтів застосовують різні способи. Найчастіше для цього проводить-

ся дослід, під час якого коливальна система примусово виводиться зі стану механічної рівноваги, а потім раптово звільнюється. В малопотужних МЕВ такий дослід можна провести «вручну», а в потужних – шляхом відключення живлення або з використанням спеціальних кріплень [10]. В обох випадках після звільнення якоря або відключення живлення рухома частина буде рухатись завдяки енергії, яка накопичена в пружній системі. Під час руху котушки в магнітному полі в ній індукується ЕРС, яка може бути виміряна осцилографом. Проведення такого дослідів для двох різних мас коливальної частини дає вичерпну інформацію про значення коефіцієнтів, що входять до рівнянь (2), (3).

Експериментальне визначення механічних параметрів проводилось для дослідного зразка МЕВ з характеристиками, наведеними в табл. 1.

Рис. 3, а ілюструє часову діаграму індукованої в котушці ЕРС під час двох дослідів – без вантажу та з вантажем. В останньому досліді до робочого столу приєднувався додатковий вантаж (0,025 кг). Як видно з рисунку, коливання відбуваються за синусоїдою, що згасає за експоненціальним законом. Також характерним є збільшення періоду коливань (зменшення резонансної частоти) зі збільшенням маси.

На рис. 3, б показано спектр ЕРС (діючі значення) для обох дослідів з якого видно, що резонансна частота коливальної системи зменшується від значення $f_0 = 26,299$ Гц для ненавантаженого столу до $f_1 = 24,121$ Гц для навантаженого.

Крива спектру ЕРС для ненавантаженого столу має максимум на частоті резонансу. При цьому діапазон частоти, що обмежує ділянку кривої, за межами якої потужність зменшується наполовину (-3 дБ), становить $\Delta f_{3дБ} = 15,517$ Гц.

Результати дослідів дозволяють розрахувати масу рухомої частини m_a , жорсткість k та коефіцієнт в'язкого тертя b пружної підвіски згідно наступних виразів [10]:

$$m_a = \frac{m_l f_l^2}{f_0^2 - f_l^2}; k = (2\pi f_0)^2 m_a;$$

$$b = 2\pi \Delta f_{3дБ} m_a,$$

де m_l – маса приєданого вантажу.

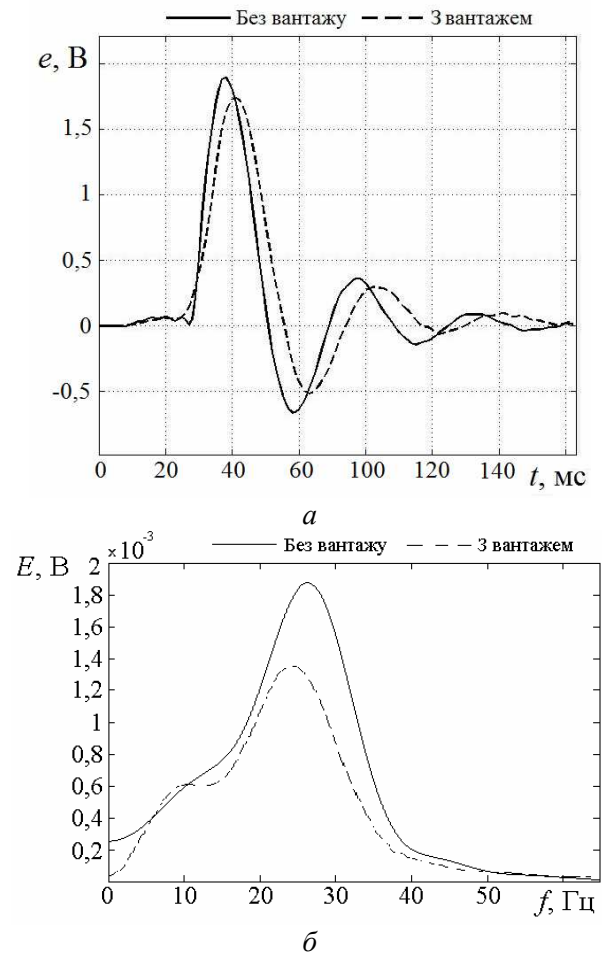


Рис. 3. Осцилограми індукованої в обмотці ЕРС (а) та її частотний спектр (б)

Fig. 3. EMF is induced in the coil and its corresponding spectra

Розраховані значення відповідних параметрів становлять: $m_a = 0,1325$ кг; $k = 3604,2$ Н/м; $b = 12,92$ кг/с.

ЕЛЕКТРИЧНА ЗАСТУПНА СХЕМА

Електрична модель МЕВ (рис. 4) містить наступні елементи. Обмотка представлена активним опором R_1 , індуктивністю розсіювання $L_{\sigma 1}$ та індуктивністю контуру взаємної індукції L_m . Наявність останнього обумовлена вихровими струмами, що протікають в осерді. Контури вихрових струмів подано еквівалентною зосередженою обмоткою з активним опором R_2 , який відповідає втратам в осерді, та індуктивністю розсіювання $L_{\sigma 2}$.

Механічна ланка побудована відповідно до рис. 2, б. Механічна частина системи спричиняє значне зростання повного опору в невеликому діапазоні частоти в околиці механічного резонансу. Взаємодія електричної та механічної ланок зумовлює наявність електричного резонансу (коли співпадають фази напруги та струму живлення), частоту якого було визначено в [9].

Відповідно до заступної схеми (рис. 4, а) диференціальні рівняння контурів машини можуть бути записані у вигляді

$$\left. \begin{aligned} u &= R_1 i_1 + K_{Ev} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + L_m \left(\frac{di_1}{dt} - \frac{di_2}{dt} \right); \\ 0 &= R_2 i_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + L_m \left(\frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right), \end{aligned} \right\} (4)$$

де i_1 – струм обмотки; i_2 – струм контуру вихрових струмів. При цьому вважається, що всі величини контуру вихрових струмів зведені до кількості витків обмотки.

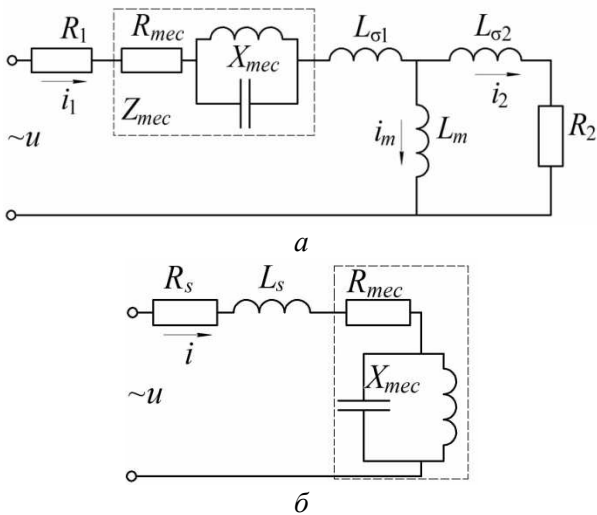


Рис. 4. Електрична заступна схема МЕВ (а) та її спрощений аналог (б)

Fig. 4. Electric equivalent circuit of the electrodynamic vibrator (a) and its simplified analogue (b)

Для розрахунків робочих характеристик МЕВ параметри контуру вихрових струмів не є необхідними, і в такому випадку заступна схема може бути спрощена. Тоді відповідні параметри контурів розсіювання та взаємної індукції можуть бути зведені до еквівалентного послідовного з'єднання індуктивного L_s та активного R_s елементів (рис. 4, б).

Далі вважатимемо, що електричні параметри МЕВ змінюються залежно від сили струму та положення обмотки, а механічні – залежно від частоти.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕВ

Внаслідок протікання змінного струму в обмотці виникають електромагнітні сили, які діють на обмотку разом з робочим столом та змушують їх переміщуватись. Експериментальне визначення електромагнітних сил під час руху є досить складним процесом. Натомість більш зручним є дослідження тягових та інших характеристик в статичному режимі, коли обмотка є нерухомою, а струм постійним. В цьому випадку не враховується вплив вихрових струмів, гістерезис та індуквана під час руху обмотки ЕРС. На підставі такого дослідження визначається здатність вібратора виконувати роботу. При цьому задача розрахунку магнітного поля може вирішуватись за допомогою рівнянь магнітостатики.

Чисельний розрахунок в магнітостатичному наближенні має на меті дослідження таких характеристик та параметрів, як електромагнітна сила, індуктивність, активний опір, їх залежність від струму й положення обмотки. Важливим є також картина розподілу магнітного поля, яка дає інформацію про значення магнітного навантаження, й може бути використана для можливого перегляду попереднього аналітичного моделювання чи оптимізації певних параметрів. Таке дослідження також дозволяє виявити оптимальне положення обмотки відносно полюсів, та виявити можливі проблемні зони магнітопроводу, оцінити тепловий режим роботи МЕВ тощо. На підставі даного дослідження визначаються значення коефіцієнтів ЕРС та електромагнітної сили, параметрів активного опору та індуктивності на невеликих частотах.

Відповідні значення параметрів визначались за допомогою чисельного розрахунку магнітного поля методом скінченних елементів. Внаслідок осьової симетрії машини

(див. рис. 1) задача вирішувалась в осесиметричній постановці.

В циліндричній системі координат векторний потенціал \mathbf{A} має єдину ϕ -компоненту $\mathbf{A} = (0, A_\phi, 0)$. Диференціальні рівняння, записані відносно векторного магнітного потенціалу, мають вигляд [6]

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e ;$$

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

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

бла, 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 – відносьне значення магнітної проникності (скалярна величина), що залежить від модуля вектора магнітної індукції; \mathbf{J}_e – густина струму в обмотці; \mathbf{B} – магнітна індукція.

В розрахунковій моделі МЕВ (рис. 5) властивості матеріалів задано наступними.

Магнітний стан матеріалу магнітопроводу та полюсів (області $D2, D3$) визначається відповідно до основної кривої намагнічування сталі, тобто

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

де \mathbf{H} – напруженість магнітного поля.

Для матеріалу магніту (область $D4$) задавалось наступне рівняння стану:

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

де \mathbf{B}_{rem} – залишкова магнітна індукція постійних магнітів.

Як граничні умови задано умову симетрії відносно осі z (див. рис. 5) та умову магнітної ізоляції на зовнішніх границях розрахункової області $D1$ – $A_\phi = 0$.

В магнітостатичному дослідженні вважається, що густина струму обмотки рівномірно розподілена по її перерізу (область $D5$), а електрична провідність навколишнього простору, каркасу обмотки та постійного магніту дорівнюють нулю.

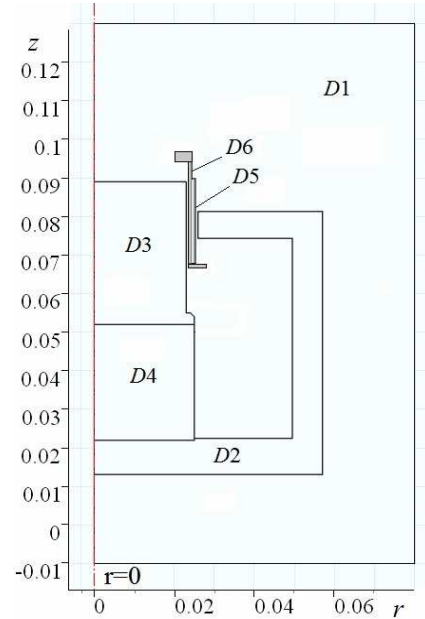


Рис. 5. Розрахункова модель МЕВ

Fig. 5. Computational model of the vibrator

Як вихідні дані задано струм обмотки, кількість її витків й переріз провідника, параметри постійного магніту (NdFeB, N42) та основна крива намагнічування сталі (Ст.3).

Результати розрахунку магнітного поля в машині (тривимірна симуляція на підставі осесиметричного рішення) ілюструє рис. 6, а. Розподіл значень радіальної компоненти магнітної індукції B_r в зоні розташування обмотки (вздовж її висоти h) показано на рис 6, б.

Для визначення коефіцієнту електромагнітної сили K_F проводився розрахунок електромагнітної сили, що діє на обмотку. Значення сили визначалось інтегруванням тензора Максвелла T по поверхні обмотки згідно виразу

$$F_e = \int_S 2\pi r n T dS ,$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні котушки S ; r – відстань від осі симетрії до поверхні інтегрування. При цьому розраховувалась осьова компонента сили F_{ez} (див. рис. 6, а), далі просто F_e .

На рис. 7, а показано залежність електромагнітної сили F_e від осьового положення котушки z для сталих значень струму в обмотці. Суцільними лініями позначено розрахункові, маркером – експерименталь-

ні дані, які отримано за допомогою дослідного зразка МЕВ з характеристиками та параметрами, наведеними в табл. 1.

В залежності від положення обмотки відносно полюсів значення електромагнітної сили має максимум. Положення механічної рівноваги рухомої частини МЕВ конструктивно суміщається з цим положенням (на рис 7, а це положення суміщено з початком координат). Тобто за відсутності струму пружна система МЕВ утримує обмотку в положенні $z = 0$. Таким чином, коливання відбуваються відносно зони, в якій ефективність енергоперетворення найвища.

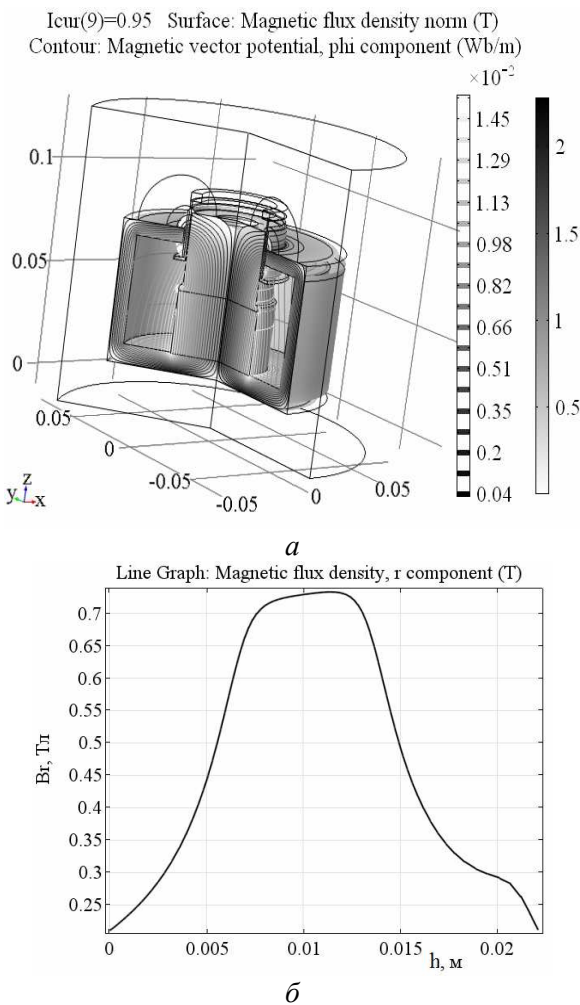


Рис. 6. Розподіл розрахункових значень векторного потенціалу (ізолінії) і модуля магнітної індукції (кольором) (а), а також радіальна складова магнітної індукції в зоні розташування обмотки (б) для значення струму $I = 0,95$ А

Fig. 6. Distribution of calculated values of the magnetic vector potential (isoline) and the magnetic flux density module (colour), and also a radial component of the magnetic flux density in the coil zone at $I = 0,95$ А

На рис. 7, б показано залежність електромагнітної сили від струму в обмотці (для положення $z = 0$). Дана залежність в робочому діапазоні зміни струму має лінійний характер і дає можливість визначити коефіцієнт електромагнітної сили K_F .

За допомогою апроксимації розрахованих значень аналітичною функцією, підбраною на підставі методу найменших квадратів, отримано залежність електромагнітної сили від струму обмотки $F_e = 6,2967 \cdot I$, звідки $K_F = 6,2967$.

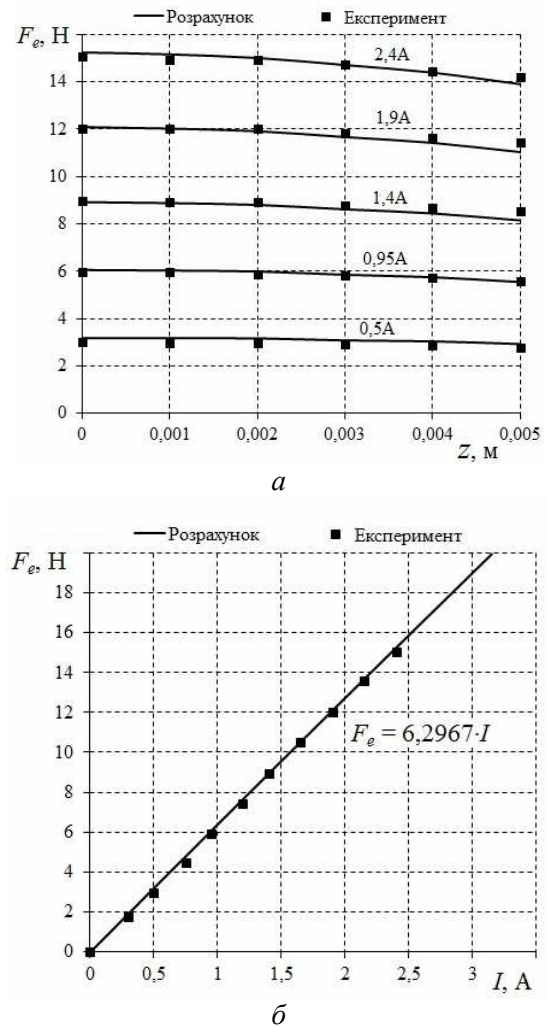


Рис. 7. Статичні тягові характеристики

Fig. 7. Thrust versus coil current

За результатами розрахунку магнітного поля можна визначити коефіцієнт ЕРС K_E , використовуючи вираз для потокозчеплення обмотки, що містить одну котушку [11],

$$\Psi = \frac{w}{S} \int 2\pi r A_\phi dS,$$

де w – кількість витків у котушці; S – площа перерізу котушки. Розраховані за допомогою даного виразу значення потокозчеплення обмотки в залежності від її положення показано на рис. 8.

Апроксимація розрахованих значень аналітичною функцією дає залежність потокозчеплення від положення обмотки $\Psi = -6,3538z + 0,0883$. На підставі отриманого виразу миттєве значення ЕРС, що індукується в обмотці під час її руху в магнітному полі, визначиться формулою

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dz} \frac{dz}{dt} = 6,3538v,$$

звідки коефіцієнт ЕРС буде дорівнювати – $K_E = 6,3538$.

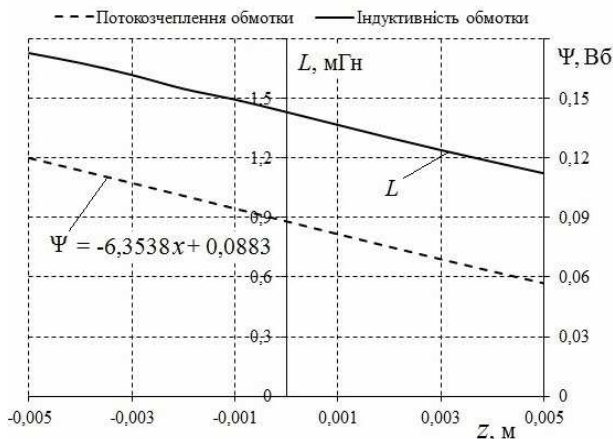


Рис. 8. Індуктивність та потокозчеплення обмотки для струму $I = 1$ А

Рис. 8. Inductance and flux linkage of the coil at $I = 1$ A

Індуктивність обмотки в електромагнітній системі з постійним магнітом може бути визначена за допомогою відношення $L = \Delta\Psi / \Delta i$, де $\Delta\Psi$ – приріст потокозчеплення, зумовлений відповідним приростом струму Δi . Результати розрахунку індуктивності обмотки в залежності від її положення показано на рис. 8.

З наведеного рисунку видно, що індуктивність та потокозчеплення залежать від положення обмотки, а, отже, будуть змінюватись під час її руху. Це буде мати певний вплив на динамічну поведінку системи. Оскільки найбільша амплітуда коливань спостерігається на частотах, наближених до

частоти механічного резонансу ω_0 , то очевидно, що зміна параметрів в залежності від переміщення на цих частотах проявитиметься найбільше. В іншому випадку, коли частота коливань відрізняється від резонансної, така зміна параметрів може бути знехтувана. Крім того, визначальний вплив на резонансні властивості системи має навантаження. Тому в робочому режимі амплітуда коливань зазвичай є невеликою. За таких обставин відповідні значення параметрів під час розрахунку робочих характеристик МЕВ можуть прийматись незалежними від переміщення як це зроблено, наприклад, в роботах [7, 8, 10].

ВИСНОВКИ

На підставі представленої заступної схеми проведено розрахунок параметрів та електромеханічних характеристик магнітоелектричного вібратора.

Розроблено чисельну польову модель МЕВ, за допомогою якої проведено розрахунок параметрів заступної схеми.

Показано, що індуктивність та потокозчеплення обмотки МЕВ залежать від її положення, що буде мати певний вплив на динамічну поведінку системи. Оскільки найбільша амплітуда коливань спостерігається на частотах, наближених до частоти механічного резонансу ω_0 , то очевидно, що зміна параметрів в залежності від переміщення на цих частотах проявитиметься найбільше.

В подальшому, значення параметрів заступної схеми можуть використовуватись для розрахунку робочих характеристик МЕВ в усталених та перехідних режимах роботи під час їх проектування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kim Y.B., Hwang W.G., Kee C.D., Yi H.B. Active vibration control of suspension system using an electromagnetic damper. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, August 2001, vol. 215, no. 8, pp. 865-873.

2. *Shaw J.* Active vibration isolation by adaptive control. In Proc. IEEE International Conference on Control Applications (Hawaii, USA), August 1999, pp. 1509-1514.
3. *Голенков Г.М., Аббасян Мохсен.* Электромеханические характеристики коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов // Технічна електродинаміка. – Київ, – 2014. – № 3. – С. 64-69.
4. *Fundamentals of Electrodynamic Vibration Testing Handbook*, 24 p., available at: <http://thermotron.com/vibration-ebook>.
5. *Мильх В.И., Полякова Н.В.* Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, – 2006. – №2. – С. 40-46.
6. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Мультифизическое моделирование в электротехнике. Монография. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, – 2015. – 305 с.
7. *Martino O., Ajangnay A.* Hybrid time-frequency domain adaptive filtering algorithm for electrodynamic shaker control. Journal of Engineering and Computer Innovations, vol. 2(10), 2011, pp. 191-205, available at: www.academ-icjournals.org/JECI.
8. *Behrens S., Fleming A.J., Reza Moheimani S.O.* Electromagnetic Shunt Damping. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), 2003, pp. 1145-1150, available at: www.precisionmechatroniclab.com/wpcontent/publications/C03b.pdf.
9. *Бондар Р.П., Голенков Г.М., Литвин О.Ю., Подольцев О.Д.* Моделювання енергетичних характеристик вібратора з лінійним електричним приводом // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, – 2013. – №2. – С. 66-74.
10. *George Fox Lang.* Electrodynamic Shaker Fundamentals. Sound and vibration, April 1997, pp. 1-8, available at: www.gaoli.com.mx/articulos%20de%20interes/Electrodnamic%20shaker%20Fundamentals.pdf.
11. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, – 1986. – 488 с.
12. *Бондар Р.П.* Кутові характеристики лінійного двигуна з явнополюсним якорем приводу вібратора // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – Київ, 2014. – №84. – С. 85-92.

REFERENCES

1. *Kim Y.B., Hwang W.G., Kee C.D., Yi H.B., 2001.* Active vibration control of suspension system using an electromagnetic damper. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.215, No.8, 865-873.
2. *Shaw J., 1999.* Active vibration isolation by adaptive control. In Proc. IEEE International Conference on Control Applications (Hawaii, USA), 1509-1514.
3. *Golenkov G.M., Abbasian M., 2014.* Elektromehaniicheskie harakteristiki koaksialno-lineynogo dvigatelya s aksialnyim i radialnyim napravleniyami namagnichivaniya postoyannyih magnitov [Electromechanical characteristics of coaxial-linear motor with axial and radial direction of permanent magnet magnetization]. Tekhnichna elektrodynamika, No.3, 64-69. – (in Russian).
4. *Fundamentals of Electrodynamic Vibration Testing Handbook*, 24, available at: <http://thermotron.com/vibration-ebook>.
5. *Milykh V.I., Polyakova N.V., 2006.* Opredelenie elektromagnitnyih parametrov elektricheskikh mashin na osnove chislennyih raschetov magnitnyih poley [Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field]. Elektrotehnika i electromehaniika, No.2, 40-46. – (in Russian).
6. *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).
7. *Martino O., Ajangnay A., 2011.* Hybrid time-frequency domain adaptive filtering algorithm for electrodynamic shaker control. Journal of Engineering and Computer Innovations, vol. 2(10), 191-205, available at: www.academicjournals.org/JECI.
8. *Behrens S., Fleming A.J., Reza Moheimani S.O., 2003.* Electromagnetic Shunt Damping. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), 1145-1150, available at: www.precisionmechatroniclab.com/wpcontent/publications/C03b.pdf.
9. *Bondar R.P., Golenkov G.M., Lytvun A.Yu., Podoltsev A.D., 2013.* Modelyuvannya enerhetichnykh kharakterystyk vibratora z liniynym

- elektrychnym pryvodom [Modeling of power characteristics of the vibrator with a linear electric drive]. *Electromechanichni i energozberigayuchi systemy*, No.2(22), 66-74. – (in Ukrainian).
10. *George Fox Lang.*, 1997. *Electrodynamic Shaker Fundamentals*. Sound and vibration, 1-8, available at: www.gaoli.com.mx/articulos%20de%20interes/Electrodynamic%20shaker%20Fundamentals.pdf.
11. *Kalantarov P.L., Tseytlin L.A.* 1986. Raschet induktivnostey. [Inductance calculation]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 488. – (in Russian).
12. *Bondar R.P.*, 2014. Kutovi kharakterystyky liniynoho dvyhuna z yavnopolyusnym yakorem pryvodu vibratora [Thrust-angle characteristics of a salient-pole linear motor drive of vibrator]. *Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativhi machyny* [Mining, constructional, road and melioration machines], No.84, 85-92. – (in Ukrainian).