

## ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОАКСІАЛЬНО-ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА З МАГНІТНОЮ ПРУЖИНОЮ

Г.М. Голенков, канд.техн.наук, Д.І. Пархоменко  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
пр. Повітрофлотський, 31, Київ, 03680, Україна.  
e-mail: [parkhomenkodm@gmail.com](mailto:parkhomenkodm@gmail.com)

*Досліджено амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною як електромеханічної вібраційної системи. Електромеханічні частотні характеристики двигуна були отримані шляхом математичного моделювання та експериментального дослідження при різних режимах роботи магнітної пружини. На основі проведених досліджень визначено умови роботи коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною, за яких спостерігається найвища амплітуда коливань. Наведено конструктивне рішення стенду для експериментального дослідження частотних характеристик коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною. Бібл. 8, рис. 5.*

**Ключові слова:** частотні характеристики, коаксіально-лінійний двигун, еквівалентний коефіцієнт жорсткості, магнітна пружина.

**Вступ.** У будівельному виробництві існує ряд технологічних процесів, які базуються на вібраційному впливі, наприклад, віброзанурення будівельних елементів у ґрунт, віброущільнення бетонних сумішей, вібропереміщення сипучих матеріалів та ін. [7]. Відомо, що амплітуда коливань робочого органу вібраційного обладнання досягає найвищого значення на резонансній частоті, тобто при співпадінні власної частоти коливань обладнання з частотою спонукаючої сили [2]. Під час технологічного процесу частота власних коливань вібраційної системи може змінюватися під дією зовнішніх факторів. Наприклад, при зануренні палі зі збільшенням глибини занурення збільшується лобовий опір ґрунту. А під час вібротранспортування можуть переміщуватися сипучі матеріали різних мас. У зв'язку з цим, для досягнення найбільшої ефективності власна частота коливань вібраційної системи потребує зміни під час роботи. Зміна власної частоти коливань існуючих дебалансних віброзбуджувачів з електричним та гідравлічним приводом ускладнена і потребує спеціальних конструктивних рішень. Крім цього такі віброзбуджувачі мають відомі недоліки: низький ККД через додаткові перетворювання енергії, малий ресурс через вплив ексцентрикового моменту на вали та підшипники та ін. [5].

У ряді випадків для збудження вібрації використовуються електромагнітні віброзбуджувачі [1]. Конструктивно вони значно простіші та надійніші, ніж дебалансні, але поступаються їм за енергетичними характеристиками. З ростом амплітуди коливань енергетичні характеристики ще більше погіршуються у зв'язку зі збільшенням повітряного зазору.

Перспективними приводами для робочих органів вібраційного обладнання є електричні лінійні двигуни з постійними магнітами [3, 8], проте у цих роботах відсутні конструктивні рішення по зміні частоти власних коливань під час роботи. У [3] запропоновано виконувати віброзбуджувач (ВЗ) на основі коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною (КЛД-МП), конструкцією якого передбачена можливість зміни частоти власних коливань. Проте, у роботах [3, 4, 8] не досліджувалися електромеханічні амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики КЛД-МП.

**Мета дослідження.** Визначення впливу величини та напрямку струму  $I_{\text{мп}}$  в обмотці магнітної пружини на амплітудно-частотні  $A=f(f)$  та фазочастотні  $\varphi=f(f)$  електромеханічні характеристики коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною.

**Матеріал дослідження.** Схематичне зображення коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною (МП) показано на рис. 1, а, а його бігуна – на рис. 1, б, де: 1 – корпус двигуна; 2 – пружини; 3 – коромисла; 4 – шток бігуна; 5 – полюси магнітної пружини; б – постійний магніт магнітної пружини; 7 – полюси віброзбуджувача; 8 – постійні магніти віброзбуджувача; 9, 10 – магнітопровід та обмотка індуктора магнітної пружини; 11, 12 – магнітопровід та обмотка індуктора віброзбуджувача відповідно; 13 – підшипникові щити; 14 – опорна плита.

Роботу коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною можна описати наступним чином.

Обмотка індуктора вібробуджувача (рис. 1, а) підключається до джерела змінного струму, при протіканні якого в обмотці виникає пульсуюче знакозмінне електромагнітне поле, яке при взаємодії з полем постійних магнітів на бігуні створює електромагнітну силу. Під дією цієї сили бігун зміщується у певний бік та через коромисла стискає відповідні пружини. При зміні напрямку струму в обмотці бігун здійснює рух у протилежний бік під дією електромагнітної сили та накопиченої у пружинах енергії. Таким чином виникає зворотно-поступальний рух бігуна з частотою джерела живлення.

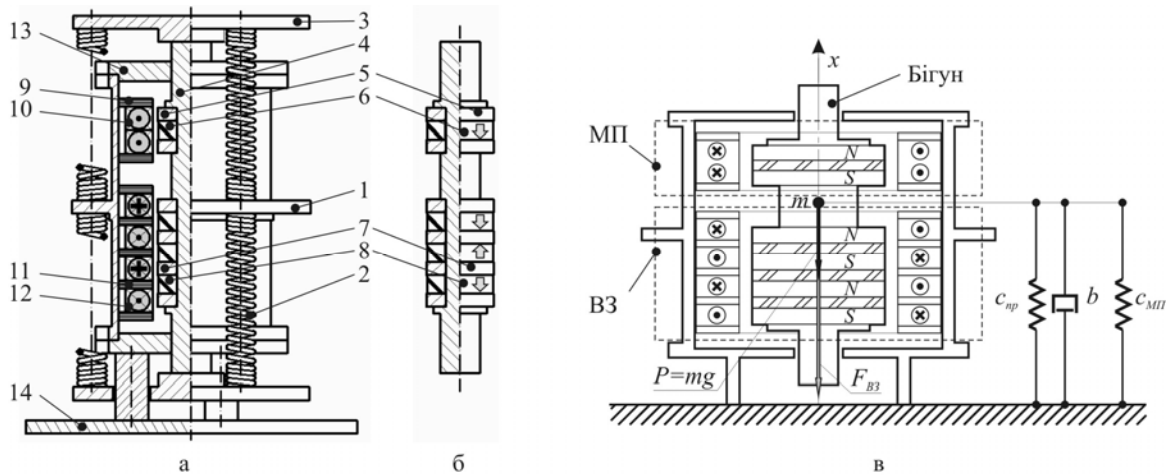


Рис. 1

Обмотка індуктора магнітної пружини під'єднується до джерела постійного струму. Протікання струму в обмотці призводить до утворення електромагнітного поля в індукторі магнітної пружини. Взаємодія електромагнітного поля індуктора та поля постійного магніту на бігуні створює електромагнітне тягове зусилля, яке діє на бігун так само, як сила, що розвивається механічною пружиною. Це зусилля, а значить і еквівалентна жорсткість магнітної пружини, визначається величиною та напрямком струму в обмотці.

Для дослідження частотних характеристик КЛД-МП пропонується кінематична схема (рис. 1, в), де вплив магнітної пружини на бігун представляється через еквівалентну жорсткість магнітної пружини.

Коливальний рух коливальної системи КЛД-МП (рис. 1, в) описується рівнянням

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + xc_{\Sigma} - P = F_{B3} \cos(\omega t - \varphi), \quad (1)$$

де  $m=6$  кг – маса коливальної частини фізичної моделі КЛД-МП;  $x$  – координата рухомої частини, яка відлічується від положення рівноваги, м;  $b$  – коефіцієнт в'язкого тертя, Н·с/м;  $c_{\Sigma}$  – еквівалентний коефіцієнт жорсткості, Н/м;  $F_{B3}$  – максимальне значення тягового зусилля ВЗ;  $\omega$  – частота спонукаючої сили, рад/с;  $\varphi$  – запізнення по фазі зміщення бігуна по відношенню до спонукаючої сили;  $P=mg$  – вага коливальної частини, Н.

Еквівалентний коефіцієнт жорсткості  $c_{\Sigma}$  представляє собою алгебраїчну суму коефіцієнтів жорсткості пружин  $c_{пр}$  та магнітної пружини  $c_{МП}$ , тобто  $c_{\Sigma} = c_{пр} + c_{МП}$ . Представлення дії магнітної пружини на коливальну систему КЛД-МП через коефіцієнт жорсткості можливе, бо електромеханічна тягова характеристика  $F_{МП} = f(x)$  магнітної пружини має лінійний вигляд [5].

Частота вільних коливань КЛД-МП обчислюється за формулою

$$\omega_0 = \sqrt{c_{\Sigma} / m}. \quad (2)$$

Амплітуду коливань КЛД-МП можна розрахувати за наступною формулою:

$$A = \frac{F_{B3}}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}}, \quad (3)$$

де  $h = b/2m$  – коефіцієнт демпфування, с<sup>-1</sup>.

Кут запізнення по фазі зміщення бігуна визначається виразом

$$\varphi = \arctg \frac{2h\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (4)$$

Резонансна частота коливань бігуна  $\omega_{рез}$  пов'язана з частотою вільних коливань виразом  $\omega_{рез}^2 = \omega_0^2 - h^2$ , тому за умови малих значень  $h$  резонансна частота  $\omega_{рез}$  наближено дорівнює частоті власних

коливань  $\omega_0$ , тобто  $\omega_{рез} \approx \omega_0$ . Наприклад, для значень  $\omega_0 = 100$  рад/с ( $f_0 = 15,9$  Гц) та  $h = 14,3$  відмінність між частотами власних коливань та резонансною складає близько 1%.

Інерційна сила, яку створює двигун при коливальному русі, обчислюється за формулою

$$F_{ic} = Am\omega^2. \quad (5)$$

Для розрахунку коефіцієнта динамічного підсилення використовується наступний вираз:

$$\beta = A_{рез} / A_0, \quad (6)$$

де  $A_0$  – статична деформація під дією тягового зусилля вібробудувача  $F_{вз}$ .

Експериментальне дослідження частотних характеристик коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною проводилося на стенді. Корпус КЛД-МП (рис. 1, а) за допомогою болтових з'єднань жорстко фіксувався на фундаменті стенду у вертикальному положенні, а на бігуні закріплювався датчик прискорення. Принципова електрична схема стенду показана на рис. 2, де: UZ – частотний перетворювач; SA1, SA2 – вимикачі; SA3 – перемикач; ЛАТр – лабораторний автотрансформатор; VD1 – напівпровідниковий випрямляч; PA1 – амперметр; PU1 – вольтметр; P1 – комплект вимірювальних приладів К-50; P2 – осцилограф; BA – датчик струму; BG – датчик прискорення.

Частота  $f$  змінної напруги  $U_{вз}$ , яка живить обмотку вібробудувача КЛД-МП, встановлюється

за допомогою перетворювача частоти UZ у межах 10÷30 Гц (значення частоти вільних коливань КЛД-МП, яке визначене попереднім розрахунком за формулою (2), відповідає  $f_0 \approx 16$  Гц). Діюче значення напруги при цьому підтримується постійним,  $U_{вз} = 46$  В (при вказаному значенні напруги максимальна амплітуда коливань не перевищувала значення, передбачене конструкцією двигуна). Споживана активна потужність  $P$  вібробудувача вимірюється за допомогою комплексу вимірювальних приладів P1.

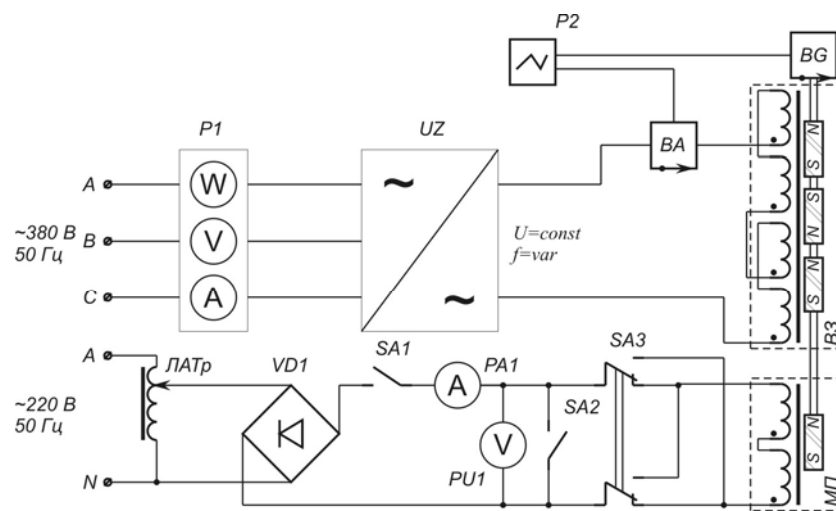


Рис. 2

Режим роботи магнітної пружини визначається комбінацією вимикачів.

При замиканні контактів вимикача SA1 обмотка магнітної пружини під'єднується до джерела живлення з регульованим значенням напруги, яке складається з автотрансформатора ЛАТр та випрямляча VD1. Вмикання вимикача SA2 (при розімкненому SA1) призводить до замикання обмотки магнітної пружини накоротко для встановлення режиму генераторного гальмування.

Значення струму  $I_{мп}$  обмотки магнітної пружини встановлюється за допомогою автотрансформатора та контролюється вимірювальними приладами PA1 та PU1. Напрямок струму  $I_{мп}$  задається положенням перемикача SA3.

Експериментальне дослідження частотних характеристик КЛД-МП проводилося при активному режимі роботи магнітної пружини, тобто для значень струму обмотки  $I_{мп} = \pm 1,5$  А;  $\pm 3,65$  А (такі значення струму були обрані з міркувань зручності проведення експерименту та допустимих значень густини струму в провідниках обмотки). Ці значення струму відповідають значенням густини струму у провідниках обмотки 3,79 А/мм<sup>2</sup> та 9,23 А/мм<sup>2</sup> відповідно, а потужність магнітної пружини при цьому складає  $P_{мп(1,5 А)} = 34,2$  Вт та  $P_{мп(3,65 А)} = 202,5$  Вт. Дослідження частотних характеристик також проводилося для режиму відсутності струму в обмотці магнітної пружини ( $I_{мп} = 0$ ) та генераторного гальмування ( $I_{мп} = f(\omega)$ ) магнітної пружини.

Отримані у ході експериментального дослідження осцилограми миттєвих значень прискорення та струму оброблювалися наступним чином. Середньоквадратичне значення струму обмотки вібробудувача визначалося за формулою

$$I_{B3} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{B3}^2(t) dt}, \quad (7)$$

де  $T$  – період коливання, с;  $i_{вз}$  – миттєве значення струму обмотки вібробуджувача, А.

По встановлених значеннях прискорення були розраховані положення бігуна  $x$  у певний момент часу  $t$ . Амплітуда коливання  $A$  бігуна знаходилася як середнє значення між координатами крайніх положень бігуна  $x_{min}$  та  $x_{max}$ , тобто  $A=(x_{max} - x_{min})/2$ . Кут зсуву фаз  $\varphi$  між струмом обмотки вібробуджувача та положенням бігуна КЛД-МП знаходився графоаналітичним способом. Для його розрахунку використовувався вираз  $\varphi=180^\circ t_\varphi/T$ , де  $t_\varphi$  – час, на який переміщення бігуна запізнюється або випереджає коливання струму, с.

Після обробки осцилограм були отримані електромеханічні амплітудно-частотні характеристики КЛД-МП. Наприклад, на рис. 3 наведена АЧХ для режиму відсутності струму в обмотці магнітної пружини. З кривих залежності  $I_{вз}=f(f)$  струму в обмотці ВЗ та залежності  $P=f(f)$  активної потужності у колі живлення обмотки ВЗ видно, що найменші енерговитрати спостерігаються у діапазоні частот приблизно від  $f_n$  до  $f_{рез}$ . На резонансній частоті коливань ( $f_{рез}=16$  Гц) потужність вібробуджувача складає  $P=24$  Вт, а амплітуда коливань при цьому дорівнює  $A=6,3$  мм. На частоті, вищій за резонансну ( $f=20$  Гц), потужність вібробуджувача зростає до значення  $P=42$  Вт, а амплітуда зменшується до  $A=2,9$  мм.

Скориставшись методом електромеханічних аналогій, можна розрахувати добротність коливальної системи КЛД-МП за формулою

$$Q = f_{рез} / (f_k - f_n), \quad (8)$$

де  $f_n, f_k$  – частоти нижча (вища, відповідно) за резонансну, на якій амплітуда коливань у  $\sqrt{2}$  менша, ніж на резонансній частоті (рис. 3). Наприклад, для режиму роботи без струму в обмотці магнітної пружини  $Q=4,2$ , а зі струмом в обмотці  $I_{мп}=3,65$  А значення добротності складає  $Q=4,4$ .

Коефіцієнт в'язкого тертя визначається за формулою

$$b = 2\pi f m / Q. \quad (9)$$

Наприклад, для режиму роботи без струму в обмотці магнітної пружини  $b=170$ , а зі струмом в обмотці  $I_{мп}=3,65$  А значення коефіцієнту в'язкого тертя  $b=176$ .

Скориставшись виразами (3),(4), були отримані розрахункові електромеханічні амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною. На рис. 4, а показано сімейство кривих АЧХ для всіх досліджених режимів роботи магнітної пружини, а на рис. 4, б – криві ФЧХ для значень струму в обмотці магнітної пружини  $I_{мп}=\pm 3,65$  А, де 1 – криві, отримані розрахунком; 2 – криві, отримані дослідним шляхом.

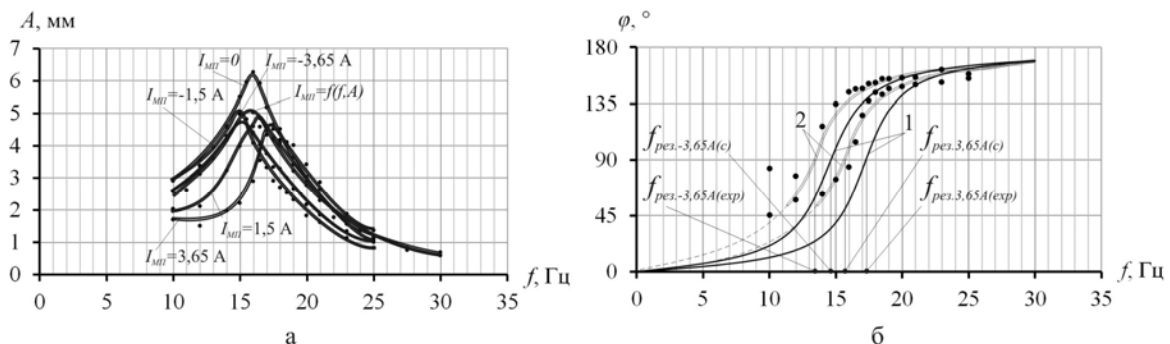


Рис. 4

Після аналізу сімейства АЧХ та ФЧХ холостого та активного режимів роботи магнітної пружини, а також генераторного режиму роботи, були отримані залежності: значення резонансної частоти коливань КЛД-МП від струму в обмотці магнітної пружини  $f_{рез}=f(I_{мп})$  (рис. 5, а), значення коефіцієнта динамічного підсилення коливальної системи КЛД-МП від струму в обмотці магнітної пружини

$\beta=f(I_{МП})$  (рис. 5, б) та значення інерційної сили, яку створює двигун  $F_{ic}=f(I_{МП})$  (рис. 5, в).

Криві залежностей на рис. 5 апроксимуються виразами

$$f_{рез} = 0,3606I_{МП} + 15,975; \quad (10)$$

$$\beta = 0,0713I_{МП}^2 + 0,1647I_{МП} + 2,8559; \quad (11)$$

$$F_{ic} = 12,464I_{МП} + 342,93. \quad (12)$$

З рис. 5 та виразів (10)–(12) видно, що значення струму в обмотці магнітної пружини лінійно впливає на значення резонансної частоти та інерційної сили, яку створює двигун. Вплив значення струму обмотки МП на коефіцієнт підсилення – нелінійний.

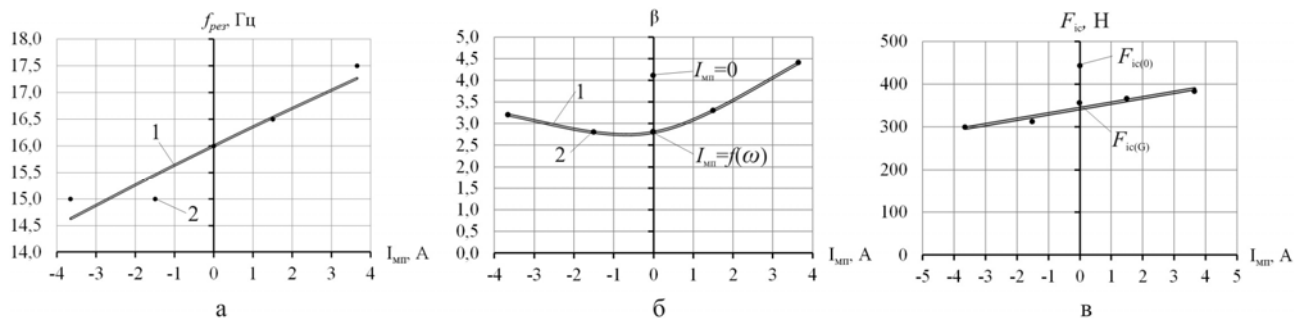


Рис. 5

Розбіжність між розрахованими та експериментальними значеннями амплітуд та резонансних частот для досліджених режимів роботи двигуна в середньому не перевищує 11%.

#### Висновки.

На основі досліджених амплітудно-частотної та фазочастотної характеристик моделі коаксіально-лінійного двигуна з магнітною пружиною були отримані аналітичні залежності значень резонансної частоти, коефіцієнта підсилення та спонукаючої сили від струму в обмотці магнітної пружини.

Результати розрахунку частотних характеристик моделі КЛД-МП підтверджені експериментальними дослідженнями на стенді. Встановлено, що діапазон частот, на якому можлива стійка робота двигуна, обмежується, з одного боку, частотою, приблизно на 10–15% меншою за резонансну, та безпосередньо резонансною частотою – з іншого. Також у цьому діапазоні частот вібробуджувач двигуна споживає найменшу потужність при найбільшій амплітуді коливань.

Для даної моделі КЛД-МП при зміні частоти власних коливань за допомогою магнітної пружини на 10% її потужність буде приблизно у 8 раз більша за потужність вібробуджувача.

1. Бауман В.А., Быховский И.И., Гольдштейн Б.Г. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.
2. Биндерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высш. школа, 1980. – 480 с.
3. Богаєнко М.В., Бондар Р.П., Голенков Г.М., Голуб В.П., Макогон С.А., Пархоменко Д.І., Попков В.С. Вібробуджувач. Патент України № 24757, 2007.
4. Бондар Р.П., Голенков Г.М., Подольцев О.Д. Розрахунок робочих характеристик лінійного двигуна зворотньо-поступального руху в пакеті Matlab/Simulink // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – № 4. – С. 13-17.
5. Вибрации в технике. Вибрационные процессы и машины. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
6. Голенков Г.М., Пархоменко Д.І. Електромеханічні тягові характеристики лінійного двигуна з постійними магнітами та магнітним підвісом // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 56-59.
7. Мартынов В.Д., Алешин Н.И., Морозов В.Д. Строительные машины и монтажное оборудование. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
8. Chang J., Kang D., Lee J., Hong J. Development of Transverse Flux Linear Motor With Permanent-Magnet Excitation for Direct Drive Applications // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41. – No 5. – Pp. 1936-1939.

УДК 621.313.84

## ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С МАГНИТНОЙ ПРУЖИНОЙ

Г.М. Голенков, канд.техн.наук, Д.И. Пархоменко

Киевский национальный университет строительства и архитектуры,

Воздухофлотский пр., 31, Киев, 03680, Украина.

e-mail: [parkhomenkodm@gmail.com](mailto:parkhomenkodm@gmail.com)

*Исследованы амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики коаксиально-линейного двигателя с магнитной пружиной как электромеханической вибрационной системы. Электромеханические частотные характеристики были получены путем математического моделирования и экспериментального исследования при различных режимах работы магнитной пружины. На основании проведенных исследований определены условия работы коаксиально-линейного двигателя с магнитной пружиной, при которых наблюдается наибольшая амплитуда колебаний. Приведено конструктивное решение стэнда для экспериментального исследования частотных характеристик коаксиально-линейного двигателя с магнитной пружиной. Библи. 8, рис. 5.*

**Ключевые слова:** частотные характеристики, коаксиально-линейный двигатель, эквивалентный коэффициент жесткости, магнитная пружина.

## THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE COAXIAL-LINEAR MOTOR WITH MAGNETIC SPRING

G.M. Golenkov, D.I. Parkhomenko

Kyiv National University of Construction and Architecture,

Povitroflotskyi ave., 31, Kyiv, 03680, Ukraine.

e-mail: [parkhomenkodm@gmail.com](mailto:parkhomenkodm@gmail.com)

*The analysis of drives of labour bodies of vibration machines and mechanisms for the building are made. The coaxial-linear motor with magnetic spring is proposed as a drive of this equipment. The construction of this motor is with possibility of change the natural oscillation frequency. The gain-frequency and phase-frequency characteristics of coaxial-linear motor with magnetic spring as an electromechanical vibration system are researched. The mathematical modelling and experimental research of electromechanical frequency characteristic of motor during the active mode of work of magnetic spring, during the no-load conditions and the mode of generator braking are researched. Based on these researches the conditions of work of coaxial-linear motor with magnetic spring with the maximal vibrational amplitude are got. The expressions of dependences of resonance frequency, gain factor and inertial power of motor from current in the winding of magnetic spring are got. The construction of the test bench for the experimental research of frequency characteristics of the coaxial-linear motor with magnetic spring is presented. References 8, figures 5.*

**Key words:** frequency characteristics, coaxial-linear motor, equivalent stiffness coefficient, magnetic spring.

1. Bauman V.A., Byhovskiy I.I., Goldshteyn B.G. Vibrating machines in the construction and production of construction materials. – Moskva: Mashinostroenie, 1969. – 544 p. (Rus)
2. Binderman V.L. Theory of mechanical vibrations. – Moskva: Vysshaia shkola, 1980. – 480 p. (Rus)
3. Bohayenko M.V., Bondar R.P., Golenkov H.M., Holub V.P., Makohon S.A., Parkhomenko D.I., Popkov V.S. Vibration exciter. Patent UA, No. 24757, 2007. (Ukr)
4. Bondar R.P., Golenkov G.M., Podoltsev A.D. Modeling of characteristics of alternating motion linear motor in Simulink/Matlab software package // Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2010. – No 4. – Pp. 13-17. (Ukr)
5. *Vibration in technique*. Vibrating processes and machines. – Moskva: Mashinostroenie, 1981. – 509 p. (Rus)
6. Golenkov H.M., Parkhomenko D.I. The electromechanical propulsion performance characteristics of coaxial-linear motor with constant magnets and magnet bracket // Tekhnichna Elektrodynamika – 2014. – No 6. – Pp. 56-59. (Ukr)
7. Martynov V.D., Aleshin N.I., Morozov B.P. Construction machinery and installation equipment. – Moskva: Mashinostroenie, 1990. – 368 p. (Rus)
8. Chang J., Kang D., Lee J., Hong J. Development of Transverse Flux Linear Motor With Permanent-Magnet Excitation for Direct Drive Applications // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41. – No 5. – Pp. 1936-1939.

Надійшла 15.09.2015

Остаточний варіант 17.11.2015