

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЖЕСТКОСТИ МАГНИТНОЙ ПРУЖИНЫ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КООКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлено результати комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження статичних електро-механічних тягових характеристик магнітної пружини вібровозбуджувача на основі коаксіально-лінійного електричного двигуна з постійними магнітами. На основі отриманих тягових характеристик була визначена еквівалентна жорсткість магнітної пружини в залежності від значень струму в обмотці. Бібл. 7, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: коефіцієнт пружності, магнітна пружина, вібровозбуджувач, коаксіально-лінійний двигун.

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования статических электро-механических тяговых характеристик магнитной пружины вибровозбудителя на основе коаксиально-линейного электрического двигателя с постоянными магнитами. На основании полученных тяговых характеристик была определена эквивалентная жесткость магнитной пружины в зависимости от значений тока в обмотке. Библ. 7, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: коэффициент жесткости, магнитная пружина, вибровозбудитель, коаксиально-линейный двигатель.

Введение. В строительном производстве существует ряд технологических процессов, которые базируются на вибрационном воздействии. Примерами таких процессов могут быть вибропогружение (виброизвлечение) строительных элементов в грунт (из грунта), виброуплотнение бетонных смесей, виброперемещение сыпучих материалов и т.п [1].

Известно [2], что амплитуда колебаний рабочего органа колебательной системы достигает наибольшего значения на резонансной частоте, т.е. при совпадении собственной частоты колебаний системы с частотой вынуждающей колебания силы. А возмущающее усилие, которое создает вибровозбудитель, растет пропорционально частоте. Таким образом, при работе на резонансной частоте вибровозбудитель достигает наибольшей эффективности.

Во время технологического процесса, собственная частота колебаний системы может изменяться в связи с изменением влияющих на систему факторов. Например, при погружении сваи, с ростом глубины погружения возрастает лобовое сопротивление грунта. А во время вибротранспортировки могут перемещаться сыпучие материалы различных масс. В связи с этим, для достижения наибольшей эффективности, собственная частота колебаний вибрационной системы нуждается в корректировке во время работы.

Изменение собственной частоты колебаний существующих дебалансных вибровозбудителей с электрическим и гидравлическим приводом усложненно и требует специальных конструктивных решений. Кроме того, такие вибровозбудители имеют известные недостатки [3]: низкий КПД из-за дополнительных преобразований энергии, малый ресурс из-за воздействия эксцентрикового момента на валы и подшипники и т.д.

В ряде случаев для возмущения вибрации применяются электромагнитные вибровозбудители [4]. Конструктивно они значительно проще и надежнее, чем дебалансные, но уступают им по энергетическим характеристикам. С ростом амплитуды колебаний, в связи с увеличением воздушного зазора, энергетические характеристики еще более ухудшаются.

Коаксиально-линейный двигатель с магнитной пружиной. Перспективным приводом для вибра-

ционных систем является электрический коаксиально-линейный двигатель с магнитной пружиной (КЛД-МП) (рис. 1) [5].

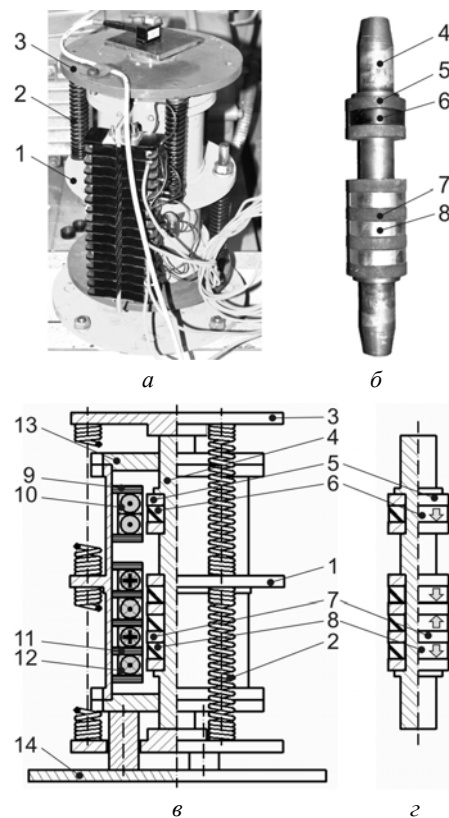


Рис. 1. Коаксиально-линейный двигатель с магнитной пружиной: а – внешний вид КЛД-МП; б – внешний вид бегуна КЛД-МП; в – конструкция КЛД-МП; г – конструкция бегуна КЛД-МП

На рис. 1 обозначено: 1 – корпус двигателя; 2 – пружины; 3 – массивные диски; 4 – шток бегуна; 5 – концентраторы магнитного потока (полюсы) магнитной пружины; 6 – постоянный магнит магнитной пружины; 7 – концентраторы магнитного потока (полюсы) вибровозбудителя; 8 – постоянные магниты вибровозбудителя; 9 – магнитопровод индуктора магнитной пружины; 10 – обмотка магнитной пружины;

11 – магнитопровод индуктора вибровозбудителя; 12 – обмотка вибровозбудителя; 13 – подшипниковые щиты; 14 – опорная плита.

Работу коаксиально-линейного двигателя с магнитной пружиной можно описать следующим образом. Обмотка индуктора вибровозбудителя (см. рис. 1) подключается к источнику переменного тока. При протекании переменного тока в обмотке вибровозбудителя возникает пульсирующее знакопеременное электромагнитное поле, которое при взаимодействии с полем системы постоянных магнитов на бегуне создает электромагнитную силу. Под воздействием этой силы бегун смещается в определенную сторону, сжимая соответствующие пружины. При изменении направления тока в обмотке, бегун совершает движение в противоположную сторону под воздействием электромагнитной силы и накопленной в пружинах энергии. Таким образом, возникает возвратно-поступательное движение бегуна с частотой питающего напряжения.

Обмотка индуктора магнитной пружины подключена к источнику постоянного тока. Протекание тока в обмотке приводит к образованию электромагнитного поля в индукторе магнитной пружины. Взаимодействие электромагнитных полей индуктора и бегуна с постоянными магнитами создает электромагнитное тяговое усилие, которое действует на бегун так же, как и усилие, развиваемое механической пружиной. Значение тягового усилия, следовательно, и эквивалентной жесткости магнитной пружины, определяется силой и направлением тока в обмотке.

Цель и задачи исследования. Исследование влияния значения тока и его направления на эквивалентную жесткость магнитной пружины коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами и магнитной пружиной.

Материал исследования. Исследование эквивалентной жесткости магнитной пружины проводилось путем определения статических электромеханических тяговых характеристик [6] с помощью методов компьютерного моделирования и экспериментального исследования физической модели КЛД-МП.

Для определения статических электромеханических тяговых характеристик расчетным путем в пакете COMSOL Multiphysics [7] была разработана компьютерная модель магнитной пружины КЛД-МП (рис. 2), где: 1 – шток бегуна; 2 – воздушная среда; 3 – корпус; 4 – концентраторы магнитного потока (полюсы); 5 – постоянный магнит; 6 – катушки; 7 – магнитопровод индуктора. Конструктивные и физические параметры компьютерной модели магнитной пружины указаны в табл. 1.

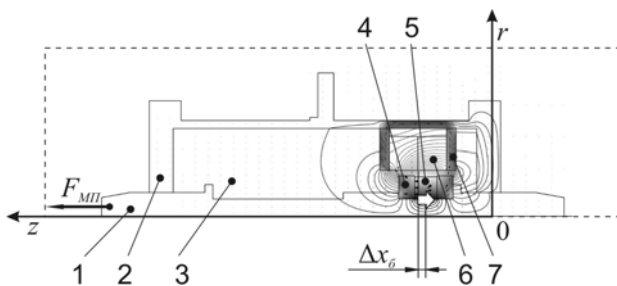


Рис. 2. Компьютерная модель магнитной пружины

Таблица 1
Конструктивные и физические параметры магнитной пружины КЛД-МП

п/п	Наименование параметра	Значение
1	Магнитопровод статора (Сталь 3):	
	- внешний диаметр магнитопровода, мм	$D_{se} = 120$
	- внутренний диаметр магнитопровода, мм	$d_s = 110$
	- длина спинки магнитопровода, мм	$l_{МП} = 48$
	- относительная магнитная проницаемость	$\mu_r = 1000$
	Зубец статора (Сталь Э2312):	
- высота зубца, мм	$h_z = 26$	
- ширина зубца, мм	$b_z = 6$	
- относительная магнитная проницаемость	табл. знач.	
2	Катушка индуктора:	
	- внешний диаметр катушки, мм	$D_e = 100$
	- внутренний диаметр катушки, мм	$d_e = 58$
- ширина катушки, мм	$b_e = 18$	
3	Бегун (шток – бронза):	
	- относительная магнитная проницаемость	$\mu_r = 1$
	Концентратор магнитного потока (Сталь 3):	
	- внешний диаметр концентратора, мм	$D_p = 51$
	- внутренний диаметр концентратора, мм	$d_p = 22$
	- ширина концентратора, мм	$b_p = 10$
	- относительная магнитная проницаемость	$\mu_r = 1000$
	Постоянный магнит (NdFeB):	
	- внешний диаметр магнита, мм	$D_{ПМ} = 50$
	- внутренний диаметр магнита, мм	$d_{ПМ} = 22$
	- ширина магнита, мм	$b_{ПМ} = 14$
	- направление намагничивания – аксиальное	ax
	- остаточная индукция, Тл	$B_{r(ПМ)} = 1,2$
- относительная магнитная проницаемость	$\mu_r = 1,06$	

Моделирование статических электромеханических тяговых характеристик магнитной пружины КЛД-МП производилось методом конечных элементов. Задача решалась как осесимметричная, в цилиндрической системе координат, в плоскости roz для векторного потенциала A , который имеет одну φ -компоненту – $A = (0, A\varphi, 0)$, в магнитостатическом приближении. Расчетная область ограничивается прямоугольником на $2l_{МП}$ (см. табл. 1) большим во все стороны чем габариты КЛД-МП (см. рис.2), на границах которой принимается условие $A\varphi = 0$.

Моделирование проводилось в пределах положения бегуна Δx_6 от 0 до 12 мм, что соответствует максимальному смещению бегуна в одну сторону, с шагом изменения положения 1 мм. В начальном положении ($\Delta x_6 = 0$) центр магнитной системы на бегуне равноудален от обоих зубцов магнитопровода индуктора.

Плотность тока в проводнике обмотки магнитной пружины задавалась равной $J = 0$; $J = 2,53$ и $5,05$ А/мм². Эти значения плотности тока соответствуют значениям тока в обмотке физической модели магнитной пружины КЛД-МП $I = 0$; $I = 1$ и $I = 2$ А. Моделирование проводилось для обоих направлений тока.

Моделирование проводилось в магнитостатическом приближении с использованием тензора натяжения Максвелла

$$T = -\frac{1}{2}n(H \cdot B) + (n \cdot H)B, \quad (1)$$

где n – вектор нормали; H – вектор напряженности магнитного поля; B – вектор магнитной индукции; T – тензор напряженности.

Выражение электромагнитной силы имеет вид

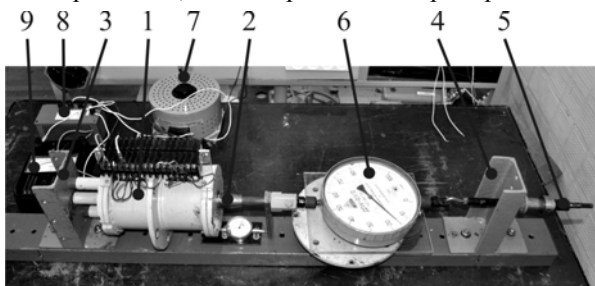
$$F = \oint_S T dS, \quad (2)$$

где S – поверхность, охватывающая объём активной зоны индуктора.

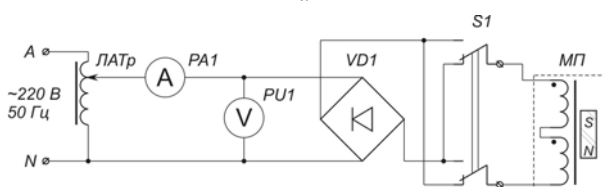
Таким образом, задача нахождения силы сводится к расчету компонент электромагнитного поля, которые для осесимметричной задачи описываются одной составляющей магнитного векторного потенциала.

В пакете COMSOL Multiphysics такая процедура нахождения продольной силы автоматизирована.

Экспериментальное исследование физической модели магнитной пружины КЛД-МП проводилось на стенде (рис. 3,а), где: 1 – корпус КЛД-МП; 2 – шток бегуна; 3 – кронштейн для крепления двигателя; 4 – кронштейн для фиксации тяги; 5 – тяга и регулировочная гайка; 6 – динамометр; 7 – автотрансформатор; 8 – выпрямитель; 9 – измерительный прибор.



а



б

Рис. 3. Стенд для экспериментального исследования магнитной пружины КЛД-МП:

а – внешний вид, б – принципиальная электрическая схема

Принципиальная электрическая схема стенда изображена на рис. 3,б, где: МП – обмотка магнитной пружины; ЛАТр – лабораторный автотрансформатор; РА1 – амперметр; ПУ1 – вольтметр; VD1 – полупроводниковый однофазный мостовой выпрямитель; S1 – переключатель направления тока.

Экспериментальный стенд (см. рис. 3) устроен следующим образом. Двигатель 1 болтовыми соединениями жестко закрепляется на кронштейне стенда 3. С помощью дополнительных элементов шток бегуна 2 соединяется со штоком динамометра 6. Корпус динамометра лежит на гладкой поверхности опорной платформы. Свободное ушко динамометра сопряжено с тягой 5, которая проходит через сквозное отверстие кронштейна 4. С помощью регулировочной гайки производится установка необходимого положения бегуна КЛД-МП.

Значение тока в обмотке магнитной пружины КЛД-МП с помощью автотрансформатора задавалось равным $I = 0$; $I = 1$; и $I = 2$ А. Направление тока устанавливалось с помощью переключателя S1.

Перед началом экспериментального исследования бегун устанавливался в начальное положение ($\Delta x_{\delta} = 0$). После подачи тока на обмотку магнитной пружины бегун несколько смещался в ту или иную сторону, что компенсировалось с помощью регулировочной гайки. После компенсации смещения показания динамометра фиксировались и устанавливалось новое положение

бегуна (бегун смещался на 1 мм). Действуя таким образом, было проведено экспериментальное исследование статических электромеханических тяговых характеристик магнитной пружины КЛД-МП в пределах положения бегуна Δx_{δ} от 0 до 12 мм.

Результаты исследований. В результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования было получено семейство тяговых характеристик $F_{МП} = f(\Delta x_{\delta}, I)$ магнитной пружины КЛД-МП (рис. 4).

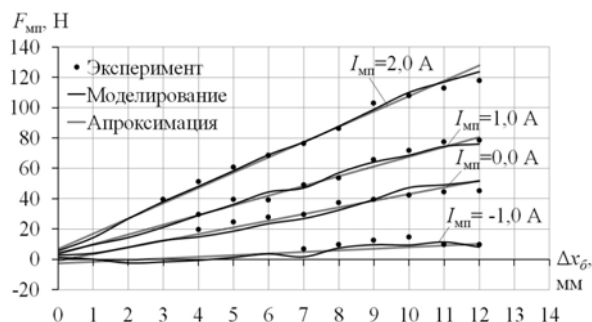


Рис. 4. Семейство тяговых характеристик $F_{МП} = f(\Delta x_{\delta}, I)$ магнитной пружины

По виду графиков (см. рис. 4) тяговых характеристик $F_{МП} = f(\Delta x_{\delta}, I)$ магнитной пружины видно, что тяговое усилие линейно возрастает с перемещением бегуна вдоль индуктора и пропорционально значению тока в обмотке. Эта зависимость при заданных значениях тока аппроксимируется линейными выражениями:

$$F_{МП}(I=-1,0A) = 1,074\Delta x_{\delta} - 2,6601; \quad (3)$$

$$F_{МП}(I=0,0A) = 4,4\Delta x_{\delta}; \quad (4)$$

$$F_{МП}(I=1,0A) = 6,4196\Delta x_{\delta} + 3,518; \quad (5)$$

$$F_{МП}(I=2,0A) = 10,088\Delta x_{\delta} + 6,7879. \quad (6)$$

Выражения (3) – (6) позволяют получить зависимость $F_{МП} = f(I)$ тягового усилия от тока в обмотке магнитной пружины при определенном положении бегуна. Например, кривая зависимости $F_{МП} = f(I)$ для положения бегуна $\Delta x_{\delta} = 12$ мм показана на рис. 5.

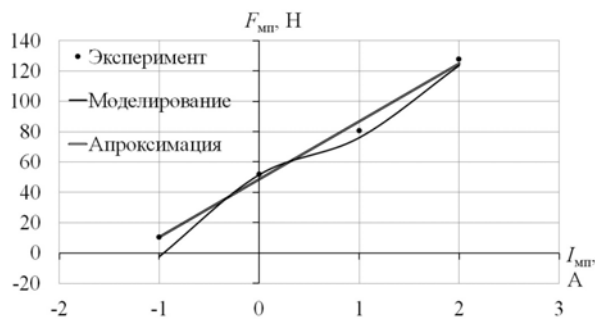


Рис. 5. Зависимость $F_{МП(\Delta x_{\delta}=12)} = f(I)$ для положения бегуна $\Delta x_{\delta} = 12$ мм

Показанная кривая зависимости $F_{МП} = f(I)$ (см. рис. 5) аппроксимируется линейным выражением

$$F_{МП(\Delta x_{\delta}=12)} = 38,153I + 48,457 \text{ (Н)}. \quad (7)$$

Таким образом, выражение эквивалентного коэффициента жесткости магнитной пружины КЛД-МП можно записать следующим образом:

$$c_{МП} = \frac{F_{МП(\Delta x_{\delta})}}{\Delta x_{\delta} \cdot 10^{-3}} = \frac{38,153I + 48,547}{12 \cdot 10^{-3}} = 3179,416I + 4045,583 \text{ (Н/м)}, \quad (8)$$

где $F_{мп(\Delta x)}$ – тяговое усилие магнитной пружины при текущем положении бегуна, Н.

Воспользовавшись выражением (8) можно получить график зависимости $c_{мп} = f(I)$ эквивалентного коэффициента жесткости магнитной пружины КЛД-МП от значения тока в обмотке (рис. 6).

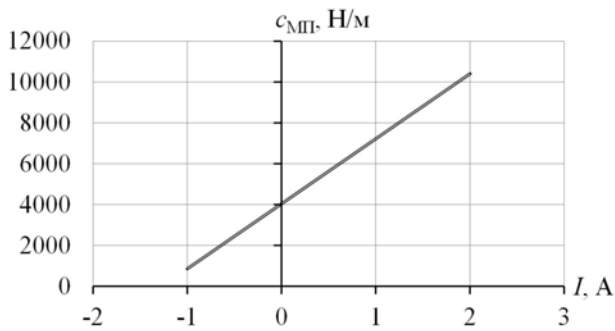


Рис. 6. Зависимость $c_{мп} = f(I)$

По виду кривой зависимости $c_{мп} = f(I)$ (см. рис.6) видно, что эквивалентный коэффициент жесткости магнитной пружины КЛД-МП принимает ненулевое значение и при отсутствии тока в обмотке.

Учитывая это, выражение (8) эквивалентного коэффициента жесткости магнитной пружины в общем виде может быть записано следующим образом:

$$c_{мп} = k_{мп}I + c_{мп,0}, \quad (9)$$

где $k_{мп}$ – коэффициент пропорциональности, Н/А·м; $c_{мп,0}$ – эквивалентный коэффициент жесткости магнитной пружины без тока в обмотке, Н/м.

Значения коэффициента пропорциональности $k_{мп}$ и эквивалентного коэффициента жесткости $c_{мп,0}$ магнитной пружины без тока в обмотке определяются конструктивными и физическими параметрами КЛД-МП.

Выводы. Разработана методика определения статических электромеханических тяговых характеристик магнитной пружины КЛД-МП путем компьютерного моделирования и экспериментального исследования физической модели.

Получено выражение эквивалентного коэффициента жесткости магнитной пружины КЛД-МП, которое позволяет рассчитать значение коэффициента жесткости в пределах допустимых значений тока в обмотке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынов В.Д., Аleshин Н.И., Морозов Б.П. Строительные машины и монтажное оборудование: Учебник для студентов вузов по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование». – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. Т.4. Вибрационные процессы и машины. Под ред. Лавендела Э.Э. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
4. Бауман В.А., Быховский И.И., Гольдштейн Б.Г. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.
5. Пат. 24757 Україна, МПК E02D 7/10, E02D 7/18, E02D 7/20. Вібробуджувач / Богаєнко М.В., Бондар Р.П., Голєнков Г.М., Голуб В.П., Макогон С.А., Пархоменко Д.І., Попков В.С. – №200702975; заявл. 21.03.2007; опубл. 10.07.2007, Бюл. №10.
6. Голєнков Г.М., Пархоменко Д.І. Електромеханічні тягові характеристики лінійного двигуна з постійними магнітами та магнітним підвісом // Технічна електродинаміка. – 2014. – №6. – С. 56-59.

7. COMSOL Multiphysics®. The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.comsol.com/comsol-multiphysics.

REFERENCES

1. Martynov V.D., Aleshin N.I., Morozov B.P. *Stroitel'nye mashiny i montazhnoe oborudovanie: Uchebnik dlia studentov vuzov po spetsial'nosti «Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye mashiny i oborudovanie»* [Construction machines and assembly equipment: Textbook for students in specialty «Lifting-and-vehicles, building, road machines and equipment»]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p. (Rus).
2. Biderman V.L. *Teoriia mekhanicheskikh kolebani: Uchebnik dlia vuzov* [Theory of mechanical vibrations: Textbook for universities]. Moscow, Vysshia shkola Publ., 1980. 408 p. (Rus).
3. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti tomakh. T.4. Vibratsionnye protsessy i mashiny. Pod red. Lavendela E.E.* [Vibration in technique: Handbook in 6 vols. Vol.4. Vibrating processes and machines. Edited by Lavendel E.E.]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1981. 509 p. (Rus).
4. Bauman V.A., Bykhovskii I.I., Gol'dshtein B.G. *Vibratsionnye mashiny v stroitel'stve i proizvodstve stroitel'nykh materialov* [Vibrating machines in the construction and production of construction materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1969. 544 p. (Rus).
5. Bohayenko M.V., Bondar R.P., Golenkov G.M., Holub V.P., Makohon S.A., Parkhomenko D.I., Popkov V.S. *Vibrozbudzhuvach* [Vibration exciter]. Patent UA, no.24757, 2007. (Ukr).
6. Golenkov G.M., Parkhomenko D.I. The electromechanical propulsion performance characteristics of coaxial-linear motor with constant magnets and magnet bracket. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2014, no.6, pp. 56-59. (Ukr).
7. COMSOL Multiphysics®. The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation. Available at: www.comsol.com/comsol-multiphysics (accessed 13 September 2004).

Поступила (received) 02.09.2015

Голєнков Геннадій Михайлович¹, к.т.н., доц., Пархоменко Дмитрій Ігоревич¹, інженер,
¹Київський національний університет будівництва і архітектури, 03680, Київ, Воздухофлотський проспект, 31, тел/phone +38 044 2415580, e-mail: gennadiymikhaylovich@mail.ua, parkhomenkodm@gmail.com

G.M. Golenkov¹, D.I. Parkhomenko¹
¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv-037, 03680 Ukraine.

Modeling of equivalent stiffness of a magnetic spring of vibration exciter based on coaxial-linear motor.

Purpose. The research of the influence of value and direction of current on the equivalent spring magnetic force based on coaxial-linear motor (CLM – MS). **Methodology.** We carried out investigation of the equivalent harshness of magnetic spring with determination of electromechanical propulsion performance characteristics by the methods of computer modeling and experimental research of physical model of CLM – MS. The modeling of magnetic spring of CLM – MS is carried out by the finite-element method. The challenge is met as an axisymmetric challenge in cylindrical co-ordinates in magnetostatic approach. The experimental investigation of the propulsion performance characteristics of magnetic spring is carried out on the test bench. **Results.** After the computer modeling and the experimental investigation of the electromechanical propulsion performance characteristics of magnetic spring the expressions of equivalent stiffness coefficient depending on the current in winding are obtained. The results of computer modeling are confirmed experimentally. **Originality.** The determination of equivalent stiffness coefficient of magnetic spring of vibration exciter based on coaxial-linear motor. **Practical value.** The obtained determination of equivalent stiffness coefficient of magnetic spring may be used in process of designing of vibration machines with devices for change of natural oscillation frequency. References 7, tables 1, figures 6.

Key words: **stiffness coefficient, magnetic spring, vibration exciter, coaxial-linear motor.**