

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ И РАДИАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Представлені результати комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі по всій довжині активної частини бігуна коаксіально-лінійного двигуна та при різних висотах повітряного зазору між бігуном та магнітопроводом індуктора для двигунів з аксіальним та радіальним напрямком намагнічування постійних магнітів.

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по всей длине активной части бегуна коаксиально-линейного двигателя и при разных высотах воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора для двигателей с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

ВВЕДЕНИЕ

На строительной площадке при возведении фундаментов и специальных технологических сооружений под землей используются погружаемые строительные изделия: сваи, шпунты, трубы и так далее. Погружение этих изделий в грунт чаще всего осуществляется вибропогружателями, мощность которых составляет 11 и более кВт [1].

При применении этих вибраторов для погружения длинномерных строительных изделий (8, 9, 10, 12 ... м) учитываются габаритные размеры этих устройств. Габаритные размеры вибропогружателя чаще всего могут быть ограничены по высоте (длине); это связано с длиной вылета стрелы или копровой мачты с направляющими базовой машины [2].

Мощность вибропогружателя, приводом рабочего органа которого является коаксиально-линейный двигатель с постоянными магнитами (NdFeB) на бегуне (КЛД-ПМ) установки для погружения свай вибростатическим способом [3], разработанном в КНУБА, соответствовала 3,6 кВт (рис. 1).

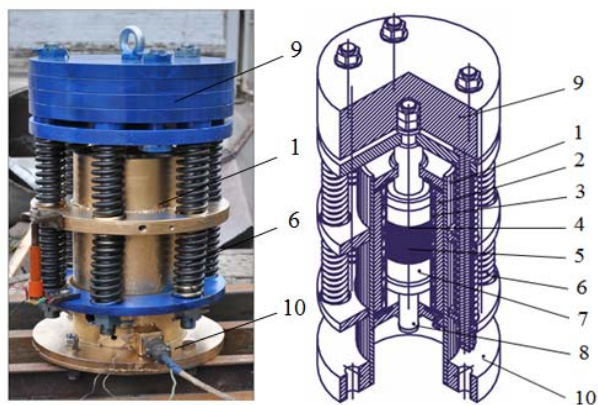


Рис. 1. Общий вид вибратора КЛД-ПМ

Вибратор КЛД-ПМ-А состоит из: статора (индуктора) – 1; магнитопровода статора – 2; обмотки статора – 3; бегуна – 4; постоянных магнитов (NdFeB) – 5; пружин – 6; концентраторов магнитного потока (полюсов) – 7; стержня бегуна – 8; дополнительной массы – 9; основания вибратора – 10. В данном двигателе КЛД-ПМ используются постоянные магниты цилиндрической формы с аксиально направленным намагничиванием (А) [4]. При этом диаметр магнитов составил 110 мм.

Следовательно, с учётом технического задания на ограничение высоты вибропогружателя, для увеличения мощности двигателя КЛД-ПМ необходимо при его построении увеличивать диаметр бегуна с его магнитной системой (полюсами).

В работе [5] предложена конструкция двигателя КЛД-ПМ, где концентраторы магнитного потока выполнены из магнитов с радиально направленным намагничиванием (Р). Такая конструкция магнитной системы бегуна позволяет увеличить диаметр полюсов, а следовательно, и увеличить мощность двигателя при заданных конструктивных параметрах по высоте КЛД-ПМ.

В работе [6] были недостаточно представлены исследования по распределению магнитной индукции по всей длине бегуна КЛД-ПМ для двигателей с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов $B = f(x)$, а также исследования, связанные с зависимостью параметров магнитной индукции от изменения радиальной высоты воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора $B_r = f(\delta)$ при одинаковых конструктивных параметрах полюсов бегуна и масса – габаритных параметрах постоянных магнитов. Поэтому данная работа является актуальной.

Целью работы являются исследования, связанные с распределением магнитной индукции по всей длине бегуна для двигателей КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов $B = f(x)$, исследования, связанные с зависимостью параметров магнитной индукции от изменения радиальной высоты воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора $B_r = f(\delta)$, а также их сравнение в абсолютных и относительных единицах при одинаковых конструктивных параметрах статора двигателя и при равных масса – габаритных параметрах постоянных магнитов на бегунах (ПМ-А и ПМ-Р).

Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

Конструктивные размеры физической модели бегунов коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами, предложенные в качестве исследуемого объекта, приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Конструктивные размеры бегунов физической модели КЛД-ПМ		
№	Наименование	Размеры
1	Конструктивные размеры полюсов бегуна (Сталь 3), мм	$D = 60; b = 40$
2	Конструктивные размеры постоянных магнитов "А", мм	$D = 50; d = 20; b = 14$
3	Масса постоянных магнитов "А" (3 ед.), кг	$m = 0,51$
4	Общая длина магнитной системы бегуна, мм	$L_0 = 112$
5	Конструктивные размеры постоянных магнитов "Р", мм	$l \times b \times h = 38 \times 10 \times 5$
6	Масса постоянных магнитов "Р" (30 ед.), кг	$m = 0,495$
7	Полюсное деление, мм	$\tau = 56$

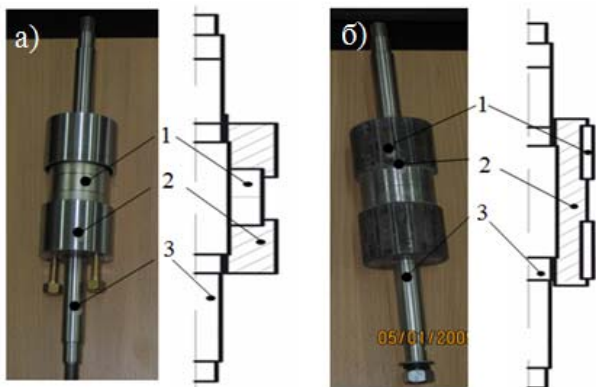


Рис. 2. Бегуны КЛД-ПМ: а – бегун КЛД-ПМ с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов; б – бегун КЛД-ПМ с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Бегуны КЛД-ПМ состоят (см. рис. 2) из: постоянных магнитов (NdFeB) – 1; полюсов – 2; металлического стержня – 3 (сталь сортовая коррозионностойкая, жаростойкая, немагнитная 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75 [7]).

Компьютерное моделирование распределения магнитной индукции КЛД-ПМ-А по всей длине активной части бегуна и при различных радиальных высотах воздушного зазора двигателя.

Для исследования компьютерного моделирования предложена модель КЛД с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов в программном пакете Comsol Multiphysics [8] (рис. 3).

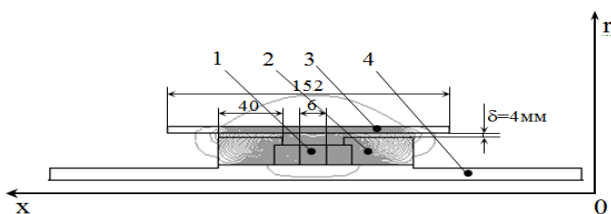


Рис. 3. Модель КЛД-ПМ-А в программе Comsol Multiphysics, где: постоянные магниты (ПМ) – 1; полюс – 2; магнитопровод индуктора (стальная пластина) – 3; бегун – 4

Предложенная модель (рис. 3) КЛД-ПМ-А имеет следующие параметры сред:

- относительная магнитная проницаемость для бегуна центральной части (стержня) – 4: $\mu_r = 1$;
- для постоянных магнитов – 1: $\mu_r = 1,06$;

- остаточная индукция магнитов $B_r = 1,2$ Тл;
- материал магнитопровода индуктора – 3 выбран из библиотеки Steel (сталь).

Численный расчёт магнитного поля выполнялся методом конечных элементов. Задача решалась как осесимметричная в цилиндрической системе координат (*xor*) с шагом 0,5 мм по оси *ox* по всей длине активной части бегуна, а по оси *or* с шагом 0,5 мм в пределах воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора двигателя (см. рис. 3). Результаты расчётов параметров магнитной индукции по всей длине активной части бегуна КЛД-ПМ-А в воздушном зазоре представлены в виде семейства характеристик $B = f(x)$ на рис. 5 (кривая *a*). Характер распределения параметров магнитной индукции для данного двигателя КЛД-ПМ-А по радиальной высоте зазора представлен в виде кривой характеристики $B_r = f(\delta)$ на рис. 9 (кривая *a*).

Компьютерное моделирование распределения магнитной индукции КЛД-ПМ-Р по всей длине активной части бегуна и при различных радиальных высотах воздушного зазора двигателя.

Для исследования компьютерного моделирования была разработана модель КЛД с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов в программном пакете Comsol Multiphysics (рис. 4).

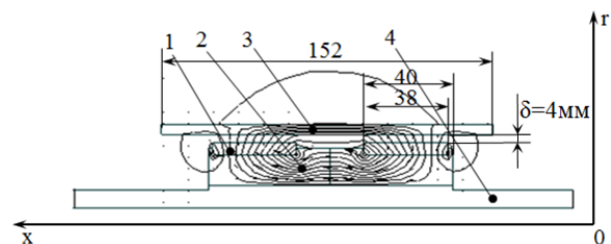


Рис. 4. Модель КЛД-ПМ-Р в программе Comsol Multiphysics, где: постоянные магниты (ПМ) – 1; полюс – 2; магнитопровод индуктора (стальная пластина) – 3; бегун – 4

Предложенная модель (рис. 4) КЛД-ПМ-Р имеет такие же параметры сред, как и в случае для модели КЛД-ПМ-А, кроме направления намагничивания постоянных магнитов (вместо оси *x* ось *r*).

Численный расчёт магнитного поля проводился для коаксиально-линейного двигателя КЛД-ПМ с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов при тех же граничных условиях, что и для двигателя КЛД-ПМ-А.

Результаты расчётов параметров магнитной индукции по всей длине активной части бегуна КЛД-ПМ-Р в воздушном зазоре представлены в виде семейства характеристик $B = f(x)$ на рис. 5 (кривая *b*).

Характер распределения параметров магнитной индукции для данного двигателя КЛД-ПМ-Р по радиальной высоте зазора представлен в виде кривой характеристики $B_r = f(\delta)$ на рис. 9 (кривая *b*).

Таким образом, максимальное значение магнитной индукции для двигателя КЛД-ПМ-А (см. рис. 5, кривая *a*) при радиальной высоте зазора 0,5 мм составляет $B = 0,29$ Тл, а при 2,5 мм составляет $B = 0,24$ Тл. Максимальное значение магнитной индукции для двигателя КЛД-ПМ-Р (см. рис. 5, кривая *b*) при радиальной высоте зазора 0,5 мм составляет $B = 0,49$ Тл, а при 4 мм составляет $B = 0,4$ Тл.

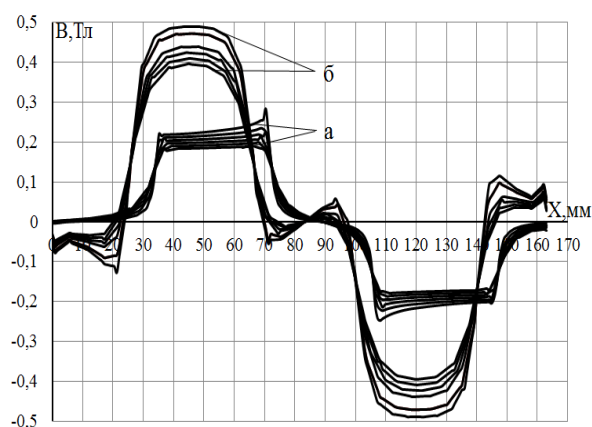


Рис. 5. Семейство характеристик распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного двигателя: а – с аксиальным; б – с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Экспериментальные исследования распределения магнитной индукции в зазоре КЛД-ПМ.

На рис. 6. изображен стенд для проведения экспериментального исследования коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

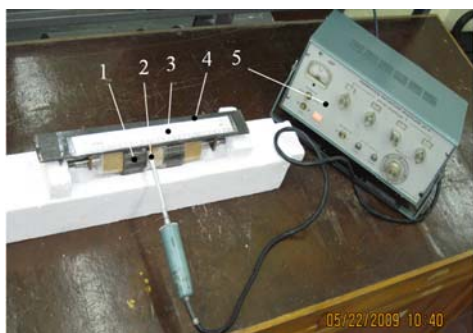


Рис. 6. Стенд для исследования магнитной индукции в зазоре КЛД-ПМ

Стенд включает: бегун КЛД-ПМ – 1; датчик для измерения магнитной индукции (щуп) – 2; линейку для фиксации опытов при измерении магнитной индукции – 3; стальную пластину (Сталь 3) "имитатор магнитопровода индуктора КЛД-ПМ" – 4; прибор для измерения магнитной индукции Ш1 – 5.

При экспериментальном исследовании распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по всей длине активной части бегуна коаксиально-линейного двигателя и при разных радиальных высотах воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора для двигателей с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов были определены условия проведения опытов, а именно: перемещение датчика для измерения значений магнитной индукции осуществлялось в воздушном зазоре двигателя строго по продольной оси магнитопровода статора (стальной пластины) по всей длине активной части бегуна с шагом 2,5 мм, а также при выбранных радиальных высотах зазора 0,5; 1,5 и 2,5 мм.

Результаты экспериментальных данных магнитной индукции по всей длине активной части бегуна двигателя КЛД-ПМ в воздушном зазоре представлены в виде семейства характеристик $B = f(x)$ на рис. 7.

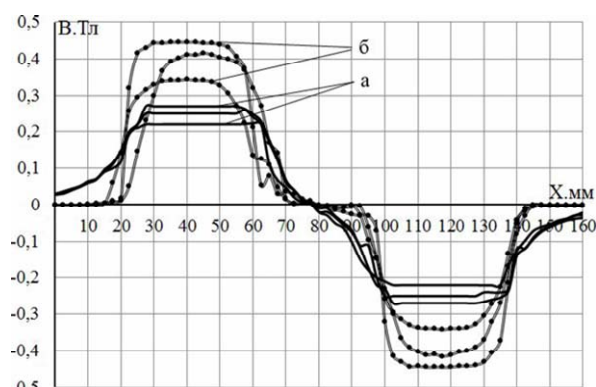


Рис. 7. Семейство характеристик распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного двигателя: а – распределение магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов; б – распределение магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Таким образом, максимальное значение магнитной индукции для двигателя КЛД-ПМ-А (см. рис. 7, кривая а) при радиальной высоте зазора 0,5 мм составляет $B = 0,26$ Тл, а в случае 2,5 мм составляет $B = 0,23$ Тл. Максимальное значение магнитной индукции двигателя КЛД-ПМ-Р (см. рис. 7, кривая б) при радиальной высоте зазора 0,5 мм составляет $B = 0,45$ Тл, а в случае 4 мм составляет $B = 0,34$ Тл.

Расхождение максимального значения магнитной индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования и экспериментального исследования КЛД-ПМ, в среднем составляет: для двигателя КЛД-ПМ-А – 10,51 %, а для двигателя КЛД-ПМ-Р – 7,11 %.

Для сравнения значений параметров магнитной индукции при экспериментальном исследовании двигателей КЛД-ПМ были выбраны кривые распределения магнитной индукции $B = f(x)$ (рис. 8) в воздушном зазоре коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов при максимальном значении индукции (то есть выбраны кривые $B = f(x)$, полученные при радиальной высоте зазора $\delta = 0,5$ мм).

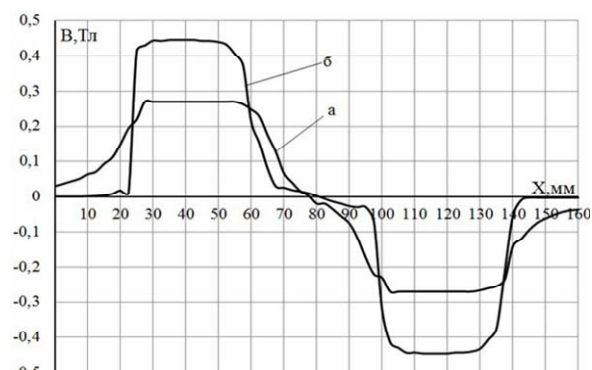


Рис. 8. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛД-ПМ: а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов; б – с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатами, полученными при экспериментальном исследовании двигателей КЛД-ПМ-А и КЛД-ПМ-Р (см. рис. 8), составляет 28 %.

На рис. 9 представлены характеристики кривых $B_r = f(\delta)$ распределения параметров магнитной индукции для данных двигателей КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов от величины воздушного зазора.

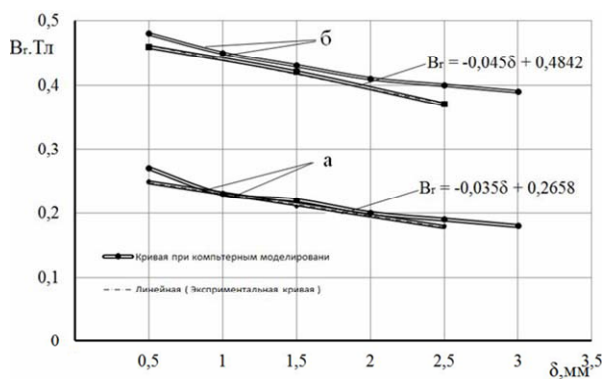


Рис. 9. Характеристики распределения магнитной индукции $B_r = f(\delta)$ по радиальной высоте зазора двигателя КЛД-ПМ, где а – кривые распределения магнитной индукции с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов; б – с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Из графиков $B_r = f(\delta)$ (см. рис. 9) видно, что изменение индукции B_r по мере увеличения радиального зазора δ прямо пропорционально уменьшается: для двигателя КЛД-ПМ-А кривые $B_r = f(\delta)$ близки выражению $B_r = -0.0358\delta + 0.2658$, а для КЛД-ПМ-Р близки выражению $B_r = -0.0458\delta + 0.4842$, т.е. характер кривых $B_r = f(\delta)$, полученных в результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования для данных двигателей, соответствует прямым линиям.

ВЫВОДЫ

В результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по всей длине активной части бегуна и при разных радиальных высотах воздушного зазора коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов можно сделать следующие выводы.

Расхождение параметров магнитной индукции, полученных в ходе компьютерного моделирования и экспериментального исследования, составило 10,51 % для двигателя КЛД-ПМ-А, а для двигателя КЛД-ПМ-Р 7,11 %, что удовлетворяет требованиям при проектировании данного типа машин.

Изменение магнитной индукции по высоте немагнитного зазора КЛД-ПМ-А меньше, чем у КЛД-ПМ-Р, таким образом, для инженерных метода расчёта коаксиально-линейных двигателей с постоянными магнитами необходимо учитывать изменение индукции по высоте, в частности, для двигателя КЛД-ПМ-Р.

Сравнивая результаты исследований по распределению магнитной индукции в зазоре двигателей КЛД-ПМ с радиальным ПМ-Р и аксиальным ПМ-А, можно сделать вывод, что более эффективным при одной и той же массе магнитов является применение магнитов с радиальным направлением намагничивания (превышение магнитной индукции для двигателя КЛД-ПМ-Р над двигателем КЛД-ПМ-А составляет 28 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смородинова М.И., Егоров А.И., Губанова Е.М. и др. Свайные работы. Справочник строителя / Под ред. М.И. Смородинова, 2-е изд., перераб. и доп. / М.: Стройиздат, 1988. – 223 с.

2. Мартынов В.Д. и др. Строительные машины и монтажное оборудование: Учебник для студентов вузов по специальности "Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование" / В.Д. Мартынов, Н.И. Аleshin, Б.П. Морозов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
3. Патент на корисну модель № 57744. Пристрій для занурювання будівельних елементів, МПК, E02D 7/20(2006.01), Богаєнко М.В., Голєнков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Сидра А.М., Срібний В.О., 10.30.2011, Бюл. № 5.
4. Патент на корисну модель № 51149. Рухомий елемент електродвигуна зворотно-поступального, МПК(2009), H02K 41/025, Барабаш В.А., Богаєнко М.В., Голєнков Г.М., Пархоменко Д.И., Попков В.С., 12.07.2010, Бюл. № 13.
5. Патент на винахід № 93168. Лінійний електродвигун зворотно-поступального руху, МПК(2011.01), H02K 33/00, H02K 41/025, Барабаш В.А., Богаєнко М.В., Голєнков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., 10.01.2011, Бюл. № 1.
6. Голєнков Г.М., Аббасян М.А. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов на бегуне // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 1. – С. 16-21.
7. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах. Т.1. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 728 с.
8. Електронний ресурс: www.comsol.com.

Bibliography (transliterated): 1. Smorodinova M.I., Egorov A.I., Gubanova E.M. i dr. *Svajnye raboty. Spravochnik stroitelja*. Moscow, Strojizdat Publ., 1988. 223 p. 2. Martynov V.D., Aleshin N.I., Morozov B.P. *Stroitel'nye mashiny i montazhnoe oborudovanie: Uchebnik dlja studentov vuzov po special'nosti "Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye mashiny i oborudovanie"*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p. 3. Bohaienko M.V., Golenkov G.M., Holub V.P., Popkov V.S., Sydra A.M., Sribnyi V.O. *Prystrii dlia zanuriuvannia budivelnnykh elementiv*. Patent UA, no. 57744, 2011. 4. Barabash V.A., Bohaienko M.V., Golenkov G.M., Parkhomenko D.Y., Popkov V.S. *Rukhomyi element elektrodvyhuna zvorotno-postupalnoho*. Patent UA, no. 51149, 2010. 5. Barabash V.A., Bohaienko M.V., Golenkov G.M., Holub V.P., Popkov V.S. *Liniinyi elektrodvyhyn zvorotno-postupalnoho rukhu*. Patent UA, no. 93168, 2011. 6. Golenkov G.M., Abbasian M.A. *Airgap magnetic induction distribution in a coaxially-linear synchronous motor with axial and radial direction of the runner permanent magnets magnetization. Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 16-21. 7. Anur'ev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja: V 3-h tomah. T.1. 5-e izd., pererab. i dop.* Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 728 p. 8. Available at: www.comsol.com (accessed 23 June 2013).

Поступила (received) 23.10.2013

Голєнков Геннадий Михайлович¹, к.т.н., доц.,
Аббасян Мохсен Алиакбарович¹, аспирант

¹ Киевский национальный университет
строительства и архитектуры,
03680, Киев, Воздухофлотский проспект, 31,
тел/phone +38 044 2415565,
e-mail: bohdant@gmail.com, mohsen12849@yahoo.com

G.M. Golenkov¹, M.A. Abbasian¹

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture
31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv-037, 03680 Ukraine

Simulation of magnetic induction distribution in a coaxial linear motor with axial and radial direction of permanent magnets magnetization.

The paper presents results of computer simulation and experimental study of magnetic induction distribution in a coaxial linear motor air gap throughout the length of the runner active part at different heights of the air gap between the runner and the inductor magnetic core for motors with axial and radial direction of the permanent magnets magnetization.

Key words – magnetic induction, coaxial linear motor, permanent magnets, simulation.