

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ И РАДИАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ НА БЕГУНЕ

Представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку коаксіально-лінійного синхронного двигуна зворотньо-поступального руху в межах полюсного ділення з аксіальним та радіальним напрямом намагнічування постійних магнітів.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя возвратно-поступательного движения в пределах полюсного деления с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

ВВЕДЕНИЕ

В строительном производстве и других технологических процессах, связанных с перемещением, уплотнением, разрушением и так далее, применяются различные типы вибрационных машин [1]. Чаще всего в качестве возбудителя колебаний рабочего органа вибратора используются асинхронные двигатели с дебалансными системами возмущающих усилий [2]. Эти двигатели с дебалансным расположением возмущающих усилий имеют следующие недостатки: малую надежность работы вибраторов, большую энергоемкость, недостаточную эргономичность и автоматизацию систем управления.

В работе [3] предложен вибратор (рис. 1), приводом рабочего органа которого является коаксиально-линейный синхронный двигатель с постоянными магнитами, намагничивание которых аксиально совпадает с осью бегуна [КЛСД-ПМ-А].

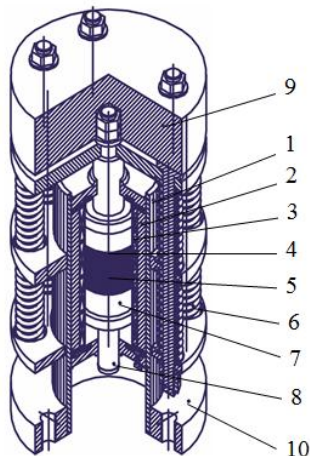


Рис. 1. Общий вид вибратора КЛСД-ПМ-А

Вибратор КЛСД-ПМ-А (рис.1) состоит из: статора (индуктора) – 1; магнитопровода статора – 2; обмотки статора – 3; бегуна – 4; постоянных магнитов (NdFeB) – 5; пружин – 6; концентраторов магнитного потока – 7; стержня бегуна – 8; дополнительной массы – 9; основания вибратора – 10.

Магнит с аксиальным направлением намагничивания коаксиально-линейного синхронного двигателя изображен на рис. 2.

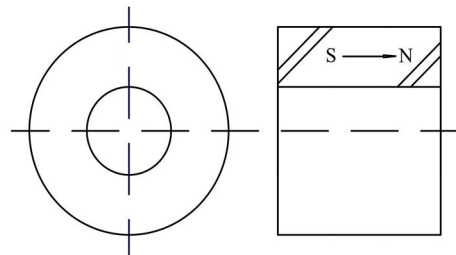


Рис. 2. Магнит с аксиальным направлением намагничивания

При поступлении на обмотку статора (3) от преобразователя частоты тока переменной полярности возникает электромагнитная сила, которая выводит из равновесия колебательную систему вибратора. Перемещение бегуна (4) и связанной с ним дополнительной массы (9) приводит к деформации пружин (6). При изменении направления прохождения тока в обмотках статора бегун перемещается в противоположную сторону под действием электромагнитной силы и накопленной в пружинах энергии, в результате чего возникает колебательное движение бегуна, которое передается на рабочий орган машины.

В строительном производстве, в частности, при погружении свай, шпунтов и других строительных изделий в грунт, используют вибропогружатели мощностью более 30 кВт [2]. Мощность вибропогружателя КЛСД-ПМ-А установки для погружения свай вибростатическим способом [4], разработанного в КНУБА, соответствовала 4,8 кВт. При этом диаметр магнитов составляет 110 мм.

Изготовление вибраторов большой мощности связано с большими размерами магнитов цилиндрической формы. Предельные размеры магнитов цилиндрической формы при существующих технологиях составляют в диаметре 250 мм [5].

Для увеличения мощности КЛСД-ПМ была предложена конструкция двигателя [6], где концентратор магнитного потока с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов изображен на рис. 3.

Концентратор (см. рис.3) состоит из постоянных магнитов с радиальным направлением намагничивания – 1 и установленного на поверхности магнитопровода – 2.

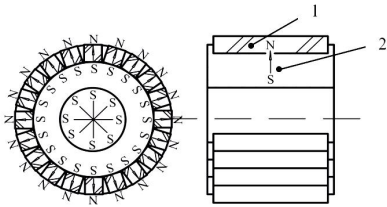


Рис. 3. Концентратор магнитного потока с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Такая конструкция концентратора магнитного потока позволит увеличить диаметр бегуна, а, следовательно, и мощность двигателя.

В работе [7] представлены математические модели, определяющие параметры электромеханических характеристик КЛСД-ПМ. Однако в ней недостаточно полно отображены результаты экспериментальных и теоретических исследований распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя как с аксиальным, так и с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов. Не представлены их сравнительные характеристики по распределению магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном исследуемых двигателей. Поэтому данная работа является **актуальной**.

Целью работы является разработка методики экспериментального исследования характеристик $B = f(x)$ распределения магнитной индукции в воздушном зазоре КЛСД-ПМ с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов. Их сравнение с компьютерным моделированием, а также сравнение характеристик $B = f(x)$ двигателей с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛСД-ПМ (ПМ-А И ПМ-Р) ПРИ ОТСУТВИИ ТОКА В ОБМОТКАХ ИНДУКТОРА

Общий вид исследуемого коаксиально-линейного синхронного двигателя, состоящего из статора цилиндрической формы с индуктором – 1; пружинами – 2; подвижной частью КЛСД-ПМ бегуна с дополнительной массой – 3, представлен на рис. 4.

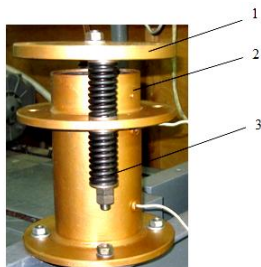


Рис. 4. Общий вид коаксиально-линейного синхронного двигателя

Длина активной части магнитопровода составляет 164 мм; активная длина бегуна 112 мм; диаметр бегуна 60 мм; масса постоянных магнитов 0,51 кг; воздушный зазор между индуктором и бегуном со-

ставляет 3 мм; немагнитный зазор 7 мм; толщина токового слоя индуктора составляет 5 мм; сечение провода обмотки индуктора $0,635 \text{ м}^2$; толщина магнитопровода индуктора 10 мм.

Магнитопровод индуктора выполнен из стальной проволоки диаметром 1 мм, уложенной на поверхности токового слоя (обмоток) индуктора с коэффициентом заполнения $K_f=0,32$.

На рис. 5 изображены: а – бегун КЛСД-ПМ с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов (ПМ-А); б – бегун КЛСД-ПМ с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов (ПМ-Р). Бегун (ПМ-А) (рис 5,а) состоит из: постоянных магнитов – 1; концентраторов магнитного потока – 2; металлического стержня – 3 (немагнитный материал). Бегун (ПМ-Р) (рис 5,б) состоит из: постоянных магнитов – 1; концентраторов – 2; металлического стержня – 3.



Рис. 5. Бегуны КЛСД-ПМ

Моделирование распределения магнитной индукции в зазоре между индуктором и бегуном КЛСД-ПМ-А. Для исследования компьютерного моделирования предложена модель коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов в программном пакете COMSOL Multiphysics (рис. 6), где: корпус статора – 1; обмотка статора – 2; магнитопровод статора – 3; бегун – 4; металлический стержень (немагнитный материал) – 5; постоянные магниты (ПМ) – 6; концентраторы магнитных потоков – 7; воздушная среда – 8.

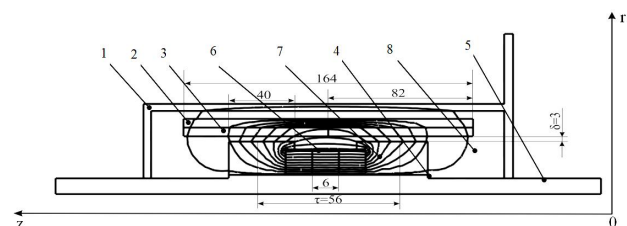


Рис. 6. Модель КЛСД-ПМ-А в программе COMSOL Multiphysics

Предложенная модель (рис. 6) КЛСД-ПМ-А имеет следующие параметры сред:

- относительная магнитная проницаемость для воздушной среды – 8: $\mu_r=1,0 \text{ Гн /м}$;
- относительная магнитная проницаемость для бегуна центральной части (стержня) – 5: $\mu_r=1,0 \text{ Гн /м}$;
- для магнитопровода индуктора – 3 выбран материал из библиотеки Soft Iron магнитомягкая сталь;
- для постоянных магнитов – 6: $\mu_r=1,06 \text{ Гн /м}$;
- остаточная индукция магнитов $B_r=1,20 \text{ Тл}$ (знак индукции чередуется по формуле SN).

Численный расчет магнитного поля выполнялся методом конечных элементов. Задача решалась как осесимметричная в цилиндрической системе координат (zOr). Расчет параметров магнитной индукции в зазоре между бегуном и индуктором проводился без следующих конструктивных элементов статора, а именно поз. 1-3 (см. рис.6.). Результаты расчетов распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов показаны на рис. 9.

Моделирование распределения магнитной индукции в зазоре между индуктором и бегуном КЛСД-ПМ-Р. Для исследования компьютерного моделирования была разработана модель коаксиально-линейного синхронного двигателя с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов в программном пакете COMSOL Multiphysics (рис. 7), где: корпус статора – 1; обмотка статора – 2; магнитопровод статора – 3; бегун – 4; металлический стержень (немагнитный материал) – 5; постоянные магниты (ПМ) – 6; концентраторы магнитных потоков – 7; воздушная среда – 8.

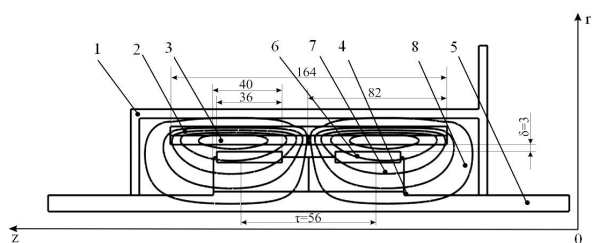


Рис. 7. Модель КЛСД-ПМ-Р в программе COMSOL Multiphysics

Предложенная модель (рис. 7) КЛСД-ПМ-Р имеет такие же параметры сред, как и в случае для модели КЛСД-ПМ-А.

Численный расчет магнитного поля для КЛСД-ПМ-Р, как и для двигателя для КЛСД-ПМ-А, выполнялся методом конечных элементов.

Результаты расчетов распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном с радиально направленным намагничиванием постоянных магнитов показаны на рис. 10.

Экспериментальные исследования распределения магнитной индукции в зазоре КЛСД-ПМ. Для проведения экспериментальных исследований коаксиально-линейного синхронного двигателя возвратно-поступательного движения КЛСД-ПМ-А и КЛСД-ПМ-Р разработан стенд (рис. 8). Стенд включает: коаксиально-линейный синхронный двигатель – 1; статор (магнитопровод индуктора) – 2; бегун КЛСД – 3; измерительный прибор магнитной индукции (Ш1-8) – 4; щуп (датчик) – 5.

Измерение магнитной индукции КЛСД-ПМ проводилось при помощи измерительного прибора Ш1-8 путем перемещения щупа в зазоре между индуктором и бегуном с шагом $\Delta x = 2,5$ мм по всей активной длине магнитопровода индуктора (рис. 9). Опыты проводились при различных положениях бегуна по отношению к индуктору в пределах полюсного деления τ , что соответствует максимальному значению амплитуды колебания X подвижной части двигателя.

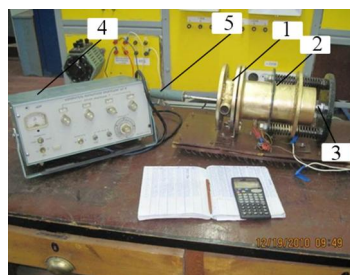


Рис. 8. Стенд для исследования магнитной индукции в зазоре КЛСД-ПМ

На рис. 9 представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

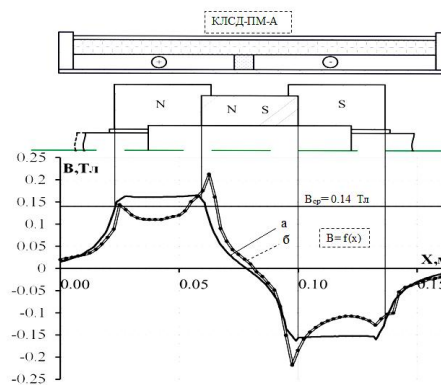


Рис. 9. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ-А: а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя, полученная в результате компьютерного моделирования; б – кривая $B = f(x)$, полученная экспериментальным путем

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования ($B_{ср} = 0,16$ Тл), и результатом, полученным в ходе экспериментального исследования ($B_{ср} = 0,20$ Тл), составляет 20 %.

На рис.10 представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с **радиальным** направлением намагничивания постоянных магнитов.

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования ($B_{ср} = 0,211$ Тл), и результатом, полученным в ходе экспериментального исследования ($B_{ср} = 0,216$ Тл), составляет 2,3 %.

На рис. 11. представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

Расхождение максимального значения индукции (см. рис.11) в воздушном зазоре двигателей с аксиальным ($B_{ср} = 0,21$ Тл) , и радиальным ($B_{ср} = 0,16$ Тл), направлением намагничивания постоянных магнитов составляет 23 %.

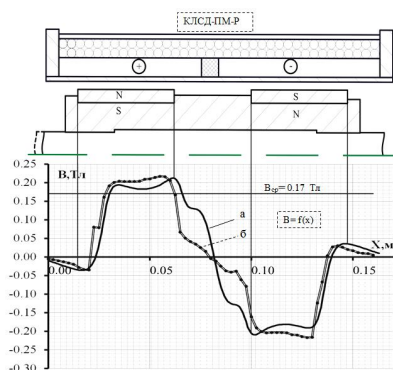


Рис. 10. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ-Р:

- а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя, полученная в результате компьютерного моделирования;
б – кривая $B = f(x)$, полученная экспериментальным путем

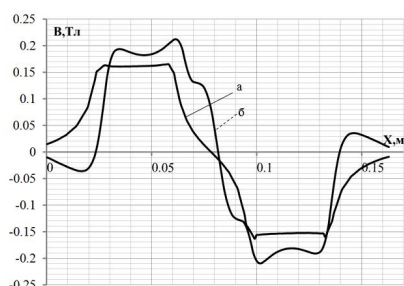


Рис. 11. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ (кривые распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя с аксиальным (а) и радиальным (б) направлениями намагничивания постоянных магнитов)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛСД-ПМ (ПМ-А И ПМ-Р) ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ОБМОТКАХ ИНДУКТОРА

Исследования показали, что модели двигателя КЛСД-ПМ, связанные с распределением магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном при наличии тока в обмотке индуктора, идентичны моделям, представленным на рис. 6, 7, а параметры сред отличаются только показателями остаточной индукции магнитов, то есть $B_r = 0$.

Численный расчет магнитного поля для КЛСД-ПМ-Р, как и для двигателя для КЛСД-ПМ-А, выполнялся методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Результаты расчетов распределения магнитной индукции в воздушном зазоре для двигателей КЛСД-ПМ-А и КЛСД-ПМ-Р показаны соответственно на рис. 13, 14.

На рис. 12 изображены: а – стенд для исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с постоянными магнитами с ПМ-А, ПМ-Р при наличии тока в обмотках индуктора; б – принципиальная электрическая схема стенда.

Стенд для исследования распределения магнитной индукции КЛСД-ПМ (рис. 11) включает: индуктор с обмоткой (ОИ) – 1; бегун КЛСД-ПМ – 2; индуктивный датчик (ИД) – 3; амперметр РА1 – 4; осциллограф OSC – 5; автотрансформатор – Тр.

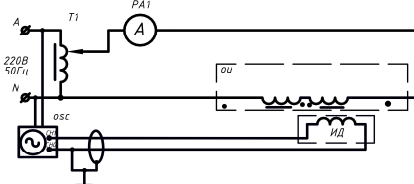
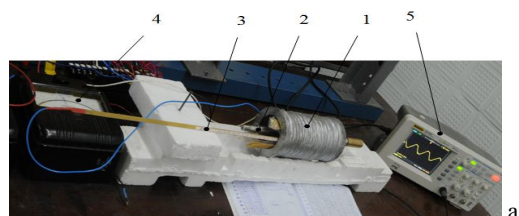


Рис. 12. Стенд для исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре КЛСД-ПМ

Экспериментальные исследования по определению значений магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном КЛСД-ПМ проводились следующим образом: на обмотку индуктора ОИ (рис. 12, б) через автотрансформатор Тр подается переменное напряжение с частотой $f = 50$ Гц, плотность тока в обмотке индуктора при этом составило $J = 3$ А/мм².

Опыты проводились при различных положениях датчика ИД в зазоре КЛСД-ПМ с шагом $\Delta x = 2,5$ мм по всей длине магнитопровода индуктора.

Индуктивный датчик ИД магнитной индукции протарирован согласно [8, 9], а также с применением некоторых положений из [9] по определению магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя.

Действующее значение ЭДС в индуктивном датчике ИД определяется согласно выражению:

$$E = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_{\text{ИД}} \cdot \Phi_{\text{max}}, \quad (1)$$

где f_1 – частота сети, Гц; $w_{\text{ИД}}$ – число витков индуктивного датчика; Φ_{max} – максимальное значение магнитного потока, Вб.

Значение магнитной индукции вычисляется по формуле:

$$B_{\delta} = \Phi_{\text{max}} / \Delta S_{\text{ИД}}, \quad (2)$$

где $\Delta S_{\text{ИД}}$ – площадь катушки индуктивного датчика ИД ($\Delta S_{\text{ИД}} = 25 \cdot 10^{-6}$), м².

На рис. 13 представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя КЛСД-ПМ-А.

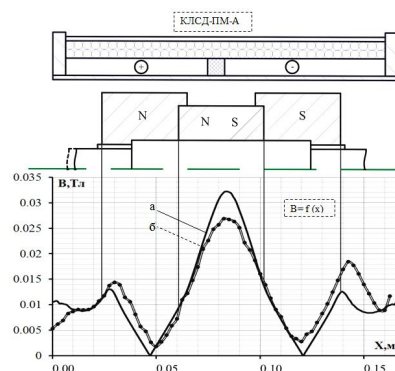


Рис. 13. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ-А:

- а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя, полученная в результате компьютерного моделирования;
б – кривая $B = f(x)$, полученная экспериментальным путем

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования ($B_{\delta} = 0,032$ Тл), и результатом, полученным в ходе экспериментального исследования ($B_{\delta} = 0,026$ Тл), составляет 18 %.

На рис. 14 представлены характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя КЛСД-ПМ-Р.

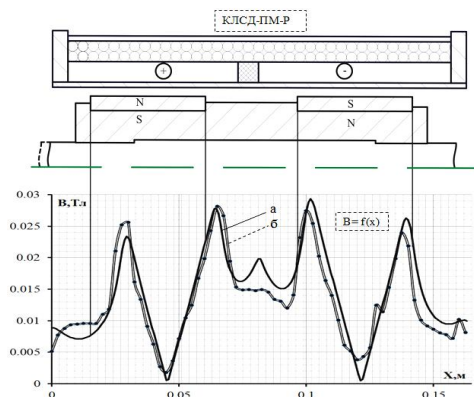


Рис. 14. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛСД-ПМ-Р:

- а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя, полученная в результате компьютерного моделирования;
- б – кривая $B = f(x)$, полученная экспериментальным путем

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования ($B_{\delta} = 0,029$ Тл), и результатом, полученным в ходе экспериментального исследования ($B_{\delta} = 0,028$ Тл), составляет 3,4 %.

ВЫВОДЫ

В результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между индуктором и бегуном двигателей КЛСД-ПМ при различных направлениях намагничивания постоянных магнитов (аксиально ПМ-А и радиально ПМ-Р), можно сделать следующие выводы.

Расхождение параметров магнитной индукции между результатами, полученными в ходе компьютерного моделирования, и результатами, полученными в ходе экспериментального исследования, составило от 3 до 15 %, что удовлетворяет требованиям при проектировании данного типа машин.

Сравнивая результаты исследований по распределению магнитной индукции в зазоре двигателей КЛСД-ПМ с радиальным ПМ-Р и аксиальным ПМ-А, более эффективным при одной и той же массе магнитов является применение магнитов для двигателей с радиальным направлением намагничивания. Так как расхождение максимальных значений индукции B_{δ} в воздушном зазоре исследуемых двигателей составляет 2-3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блехман И.И. Что может вибрация? О "вибрационной механике" и вибрационной технике. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат.лит., 1988. – 208 с.

2. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. Учебное пособие для студентов строительных и автомобильно-дорожных вузов. М.: Высш. шк., 1977. – 255 с.

3. Патент на корисну модель № 24757 Вибровозбудитель. E02D7/10(2007.01).E02D7/18(2007.01).E02D7/20(2007.01).Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Пархоменко Д.И. 10.07.2007, Бюл № 10.

4. Патент на корисну модель № 57744. Пристрій для занурювання будівельних елементів, МПК, E02D 7/20(2006.01), Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Сидра А.М., Срібний В.О., 10.30.2011, Бюл. № 5.

5. www.vltar.ru, www.neomagnetics.com.

6. Патент на винахід № 93168 Лінійний електродвигун зворотньо-поступального руху, МПК (2011.01) HD2K33/00 H02K41/025, Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С. 10.01.2011, Бюл № 1.

7. Голенков Г.М., Бондарь Р.П., Макогон С.А., Богаєнко М.В., Попков В.С. Моделирование работы электрического вибратора с коаксиально-линейным двигателем при разных законах регуляции // Техническая электродинамика. – 2007. – № 2. – С. 54-59.

8. Шимони К. Теоретическая электротехника. Мир, 1964. – 774 с.
9. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 2. – Машины переменного тока. Учебник для студентов высших техн. учеб. заведений. Изд. 3-е перераб. Л.: Энергия, 1973. – 648 с.

- Bibliography (transliterated):** 1. Blehman I.I. Chto mozhет vibraciya? O "vibracionnoj mehanike" i vibracionnoj tehnikе. - M.: Nauka. Gl. red. Fiz.-mat.lit., 1988. - 208 s. 2. Bauman V.A., Byhovskij I.I. Vibracionnyе mashiny i processy v stroitel'stve. Uchebnoe posobie dlya studentov stroitel'nyh i avtomobil'no-dorozhnyh vuzov. M.: Vyssh. shk., 1977. - 255 c. 3. Patent na korisnu model' № 24757 Vibrovозбудitel'. E02D7/10(2007.01).E02D7/18(2007.01).E02D7/20(2007.01).Bogaєnko M.V., Golenkov G.M., Golub V.P., Popkov V.S., Parhomenko D.I. 10.07.2007, Byul № 10. 4. Patent na korisnu model' № 57744. Pristrij dlya занурювання будівельних елементів, МПК, E02D 7/20(2006.01), Bogaєnko M.V., Golenkov G.M., Golub V.P., Popkov V.S., Sidra A.M., Sribnij V.O., 10.30.2011, Byul. № 5. 5. www.vltar.ru, www.neomagnetics.com. 6. Patent na винахід № 93168 Linijnij elektrodvigun zворотньо-поступального руху, МПК (2011.01) HD2K33/00 H02K41/025, Bogaєnko M.V., Golenkov G.M., Golub V.P., Popkov V.S. 10.01.2011, Byul № 1. 7. Golenkov G.M., Bondar' R.P., Makogon S.A., Bogaєnko M.V., Popkov V.S. Modelirovanie raboty `elektricheskogo vibratora s koaksial'no-linejnym dvigatelem pri raznyh zakonah reguljacii // Tehnicheskaya `elektrodinamika. - 2007. - № 2. - S. 54-59. 8. Shimoni K. Teoreticheskaya `elektrotehnika. Mir, 1964. - 774 s. 9. Kostenko M.P., Piotrovskij L.M. `Elektricheskie mashiny. Ch. 2. - Mashiny peremennogo toka. Uchebnik dlya studentov vysshih tehn. ucheb. zavedenij. Izd. 3-e pererab. L.: `Energiya, 1973. - 648 s.

Поступила 24.10.2012

Голенков Геннадий Михайлович, к.т.н., доц.,
Аббасян Мохсен

Киевский национальный университет
строительства и архитектуры
03680, Киев, Воздухофлотский проспект, 31
e-mail: mohsen12849@yahoo.com

Golenkov G.M., Abbasian Mohsen

Airgap magnetic induction distribution in a coaxially-linear synchronous motor with axial and radial direction of the runner permanent magnets magnetization.

Results of theoretical and experimental research on magnetic induction distribution in the air gap of a coaxially-linear synchronous motor with reciprocal motion within the pole pitch and axial and radial direction of the permanent magnets magnetization are presented.

Key words – magnetic induction, airgap distribution, coaxially-linear synchronous motor, permanent magnets.