

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ И РАДИАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Г.М.Голенков, канд.техн.наук, Аббасян Мохсен
Киевский национальный университет строительства и архитектуры,
Воздухофлотский проспект, 31, Киев, 03680, Украина,
e-mail: mohsen12849@yahoo.com

Проведен анализ электромеханических тяговых характеристик двух типов линейных электрических машин во-зратно-поступательного движения с постоянными магнитами на вторичном элементе (бегуне). В работе пред-ложены испытательный стенд и методики экспериментального исследования и компьютерного моделирования электромеханических тяговых характеристик коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами с аксиальным и радиальным направлениями их намагничивания. Представлены результаты компьютерного моделиро-вания и экспериментального исследования электромеханических тяговых характеристик, а также выполнен срав-нительный анализ характеристик двигателей, исследуемых в данной работе. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: коаксиально-линейный двигатель, постоянные магниты, моделирование, экспериментальные исследования, тяговые характеристики.

Введение. При возведении фундаментов и специальных технологических сооружений под землёй используются длинномерные строительные изделия (сваи, шпунты, трубы и др.), которые ча-ще всего погружаются в грунт при помощи установок с вибропогружателями мощностью от 11 кВт и более [1,7]. При выборе таких установок необходимо учитывать габаритные размеры вибропогружа-телей. Это связано с длиной вылета стрелы подъёмного крана или копровой мачты с направляющими базовой машины [3].

Для погружения свай с помощью вибростатического устройства, разработанного в КНУСА [6], был использован вибропогружатель [4] (рис. 1), в котором приводом рабочего органа является коаксиально-линейный электродвигатель (КЛД). Для возбуждения магнитного потока применены по-стоянные магниты цилиндрической формы диаметром 110 мм с аксиально направленным намагни-чиванием (ПМ-А), которые выполнены из редкоземельных материалов (NdFeB) [9]. Мощность дан-ного двигателя КЛД–ПМ–А составляет 4,8 кВт (ПВ=25%) при следующих массогабаритных размерах вибропогружателя: высота 850 мм, диаметр 360 мм и масса 180 кг.

С учётом технического задания рекомендуется при погружении длинномерных строительных изделий не увеличивать высоту вибропогружателя. Следовательно, при построении двигателя КЛД – ПМ большой мощности для вибропогружателей желательно увеличить диаметр магнитной системы бегуна с его полюсами. Применение постоянных магнитов цилиндрической формы для двигателей большой мощности связано с технологическим ограничением по их изготовлению. Предельные диа-метры магнитов при существующих технологиях не превышают 250 мм [9].

Для увеличения мощности КЛД была предложена конструкция двигателя [5], где полюса были выполнены из постоянных магнитов с радиально направленным намагничиванием (ПМ-Р). В работе [2] были представлены исследования, характеризующие электромеханические тяговые характеристики ко-аксиально-линейного двигателя с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов, однако двигатели с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов на бегуне в этих работах не были исследованы. Следовательно, не был дан сравнительный анализ электромеханических характеристик двигателей с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов при одинаковых конструктивных параметрах статора и равных по массе магнитов, приме-нённых при построении полюсов бегунов. Поэтому данная работа является актуальной.

Целью работы является определение параметров электромеханических тяговых характе-стик для двигателей КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания посто-янных магнитов и их жёсткости при перемещении бегуна в пределах половины полюсного деления $F_{\Sigma}=f(x)$, а также их сравнение в абсолютных и относительных единицах при одинаковых конст-

руктивных и электрических параметрах статора и при равных по массе магнитов, применённых при построении полюсов бегунов ПМ-А и ПМ-Р.

Исследования **электромеханических тяговых характеристик** $F_3=f(x)$ проводились с помощью физической модели коаксиально – линейного двигателя, схематичное изображение которого показано на рис. 1, *а*, где статор – 1; магнитопровод статора – 2; обмотки статора – 3; бегун – 4; пружины – 5; дополнительная масса (Сталь 3) – 6; на рис. 1, *б* – бегун с постоянными магнитами, намагничивание которых направлено аксиально (ПМ-А), а на рис. 1, *в* – бегун с постоянными магнитами, намагничивание которых направлено радиально (ПМ-Р), где: постоянные магниты – 1; концентраторы магнитного потока – 2; стержень бегуна – 3.

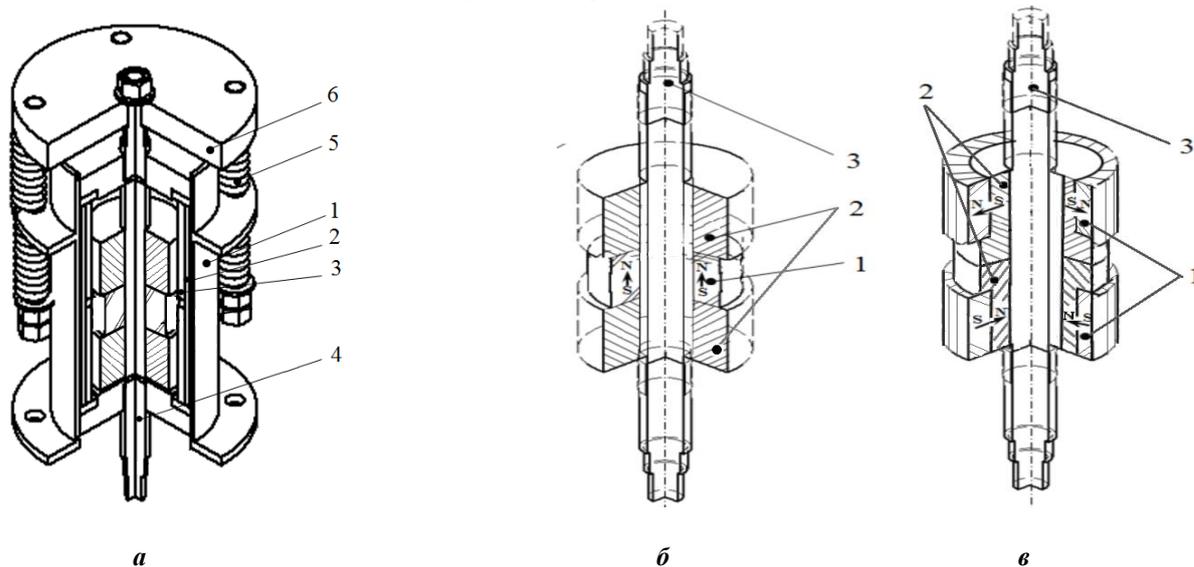


Рис. 1

Конструктивные размеры параметров физической модели коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами, предложенной в качестве исследуемого объекта, приведены в таблице.

№	Наименование	Размеры
1	Внешний диаметр магнитопровода статора, мм (стальная проволока, $d=1$ мм)	$D=96$
2	Толщина магнитопровода статора, мм	$h_{mn}=5$
3	Длина магнитопровода статора, мм	$L=152$
4	Внешний диаметр катушки статора, мм	$D=86$
5	Ширина катушки, мм	$b_k=73$
6	Толщина токового слоя статора, мм	$h_{mc}=5$
7	Сечение провода обмотки статора, мм ²	$\Delta s=0,635$
8	Число витков в катушке статора	$W=350$
9	Немагнитный зазор между магнитопроводом статора и бегуном, мм	$\delta=7$
10	Конструктивные размеры концентраторов магнитного потока, мм	$D=60; d=20; b_n=40$
11	Конструктивные размеры постоянных магнитов «А», мм	$D=50; d=20; b=14$
12	Масса постоянных магнитов «А» (3 ед.), кг	$m_A=0,51$
13	Общая длина магнитной системы бегуна, мм	$L_\delta=112$
14	Конструктивные размеры постоянных магнитов «Р», мм	$L \times b \times h=38 \times 10 \times 5$
15	Масса постоянных магнитов «Р» (30 ед.), кг	$m_p=0,495$
16	Полюсные деления, мм	$\tau=56$

Компьютерное моделирование электромеханических тяговых характеристик КЛД-ПМ.

Для исследования коаксиально-линейных двигателей (рис. 2) с аксиальным (*а*) и радиальным (*б*) направлениями намагничивания постоянных магнитов предложена компьютерная модель в программном пакете COMSOL Multiphysics [10], где: корпус статора – 1; обмотка статора – 2; магнитопровод статора – 3; бегун – 4; металлический стержень бегуна – 5; постоянные магниты (ПМ) – 6; полюса – 7; воздушная среда – 8; текстолитовые фланцы – 9.

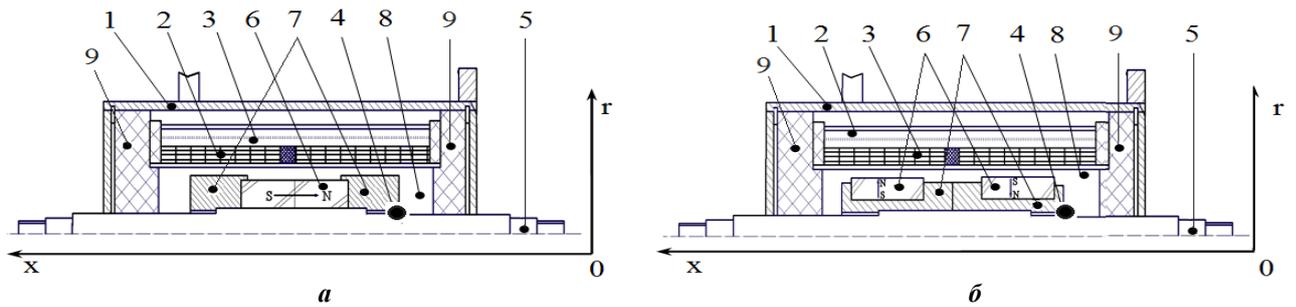


Рис. 2

Модель КЛД-ПМ-А с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов показана на рис. 2, а и имеет следующие параметры сред: относительная магнитная проницаемость для воздушной среды $\mu_r=1,0$; относительная магнитная проницаемость для бегуна центральной части (стержня) $\mu_r=1,0$; для магнитопровода статора 3 выбрана магнитомягкая сталь из библиотеки Soft Iron; для постоянных магнитов 6 $\mu_r=1,06$; остаточная индукция магнитов $B_r=1,20$ Тл; направление намагничивания постоянных магнитов – по оси x .

Моделирование электромеханических характеристик проводилось при токах в обмотках статора со значениями $I=1; 2; 3; 4$ и 5 А; плотность тока в обмотке статора соответственно составила $J=1,573; 3,14; 4,72; 6,29$ и $7,87$ А/мм².

Численный расчёт магнитного поля и параметров электромеханических тяговых характеристик выполнялся методом конечных элементов. Задача решалась как осесимметричная в цилиндрической системе координат (xor). Результатом численного моделирования в пакете COMSOL стало распределение компонент электромагнитного поля, на основе которого непосредственно в расчётном пакете вычислялось механическое усилие.

Характер электромеханических тяговых характеристик $F_{\text{э}}=f(x)$ для данного двигателя КЛД-ПМ-А представлен на рис. 4, а в виде семейства кривых I .

Модель двигателя КЛД-ПМ-Р с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов представлена на рис. 2, б, где использованы те же обозначения, что и на рис. 2, а.

Предложенная модель 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). Моделирование электромеханических характеристик и численный расчет магнитного поля для двигателя КЛД-ПМ-Р проводились при тех же значениях токов в обмотках статора, что и для двигателя КЛД-ПМ-А, и выполнялись методом конечных элементов. Тяговые усилия рассчитывались в зависимости от смещения бегуна аналогично предыдущему примеру.

Характер электромеханических тяговых характеристик $F_{\text{э}}=f(x)$ для двигателя КЛД-ПМ-Р показан на рис. 4, б в виде семейства кривых I .

Экспериментальные исследования электромеханических тяговых характеристик КЛД-ПМ. Для получения экспериментальных электромеханических тяговых характеристик $F_{\text{э}}=f(x)$ коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами на бегуне разработан стенд (рис. 3). На рис. 3, а схематично изображен стенд для испытания КЛД-ПМ, где: платформа для крепления КЛД-ПМ – 1; статор – 2; магнитопровод статора – 3; обмотки статора – 4; бегун – 5 (бегун может быть как с аксиальным, так и с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов); шток – 6; консоль – 7; опорная стойка – 8; гайка для фиксации положения бегуна (ФПБ) – 9; индикатор часовой (прибор для контроля перемещения бегуна) – ИЧ-10; динамометр – ДПУ-0,1/2.

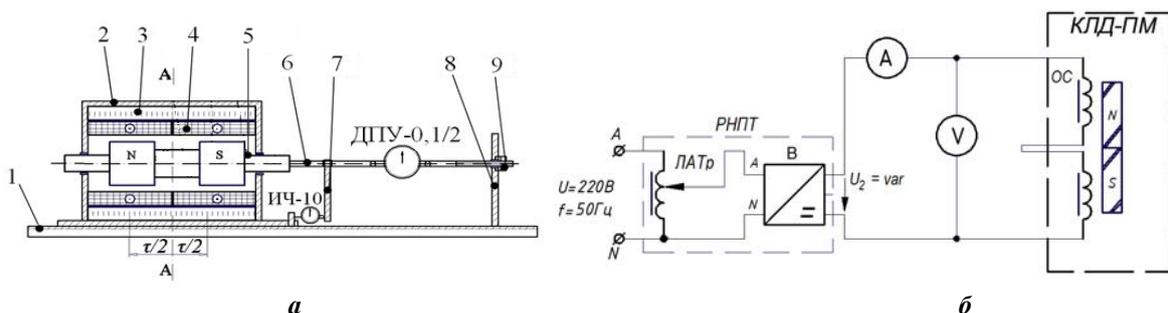


Рис. 3

Схема электрическая принципиальная стенда для испытания коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами показана на рис. 3, б. Схема включает коаксиально-линейный двигатель с постоянными магнитами КЛД-ПМ, где: ОС – обмотка статора; SN – постоянные магниты; А – амперметр; V – вольтметр; РНПТ – регулятор напряжения постоянного тока, который состоит из ЛАТРа – лабораторного автотрансформатора и В – выпрямителя.

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Бегун устанавливается в заданное положение относительно поперечной оси двигателя А-А (рис. 3, а), на обмотку статора ОС двигателя через РНПТ подается ток (рис. 3, б), при этом за счёт потокоцепления магнитных систем статора двигателя и бегуна создаётся электромагнитная сила $F_{\text{Э}}$. При помощи гайки ФПБ через шток, связанный с сердечником бегуна, устанавливают бегун в заданное положение (рис. 3, а), при этом фиксируются параметры тягового усилия при помощи динамометра ДПУ-0,1/2: напряжение и ток. Контроль за положением бегуна осуществлялся при помощи часового индикатора ИЧ-10. Опыты проводились при различных фиксированных положениях бегуна по отношению к середине поперечной оси двигателя А-А в пределах половины полюсного деления $\tau/2$ (рис. 3, а) с шагом $\Delta x=1$ мм. Электромеханические тяговые характеристики $F_{\text{Э}}=f(x)$ снимались при различных токовых нагрузках в обмотке статора двигателя, а именно при токах $I=1; 2; 3; 4$ и 5 А. Плотность токов при этом в обмотках статора составила соответственно $J=1,573; 3,14; 4,72; 6,29$ и $7,87$ А/мм². Указанные плотности токов в обмотке статора не вызывают насыщение стали и при условии кратковременности проведения опытов при больших плотностях тока не приводили к перегреву конструктивных элементов двигателя.

На рис. 4, а представлено семейство электромеханических тяговых характеристик $F_{\text{Э}}=f(x)$ коаксиально-линейного двигателя с **аксиальным** направлением намагничивания постоянных магнитов: 1 – расчётные электромеханические тяговые характеристики; 2 – экспериментальные. Расхождение максимальных значений параметров электромеханических характеристик $F_{\text{Э}}=f(x)$ между компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями при $x=0$ составило 3,61%, а при $x=10$ мм – 10,36%.

На рис. 4, б представлено семейство электромеханических тяговых характеристик $F_{\text{Э}}=f(x)$ коаксиально-линейного двигателя с **радиальным** направлением намагничивания постоянных магнитов: 1 – расчётные тяговые характеристики; 2 – экспериментальные. Расхождение максимальных значений параметров электромеханических характеристик $F_{\text{Э}}=f(x)$ между компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями при $x=0$ составило 2,87%, а при $x=10$ мм – 2,86% .

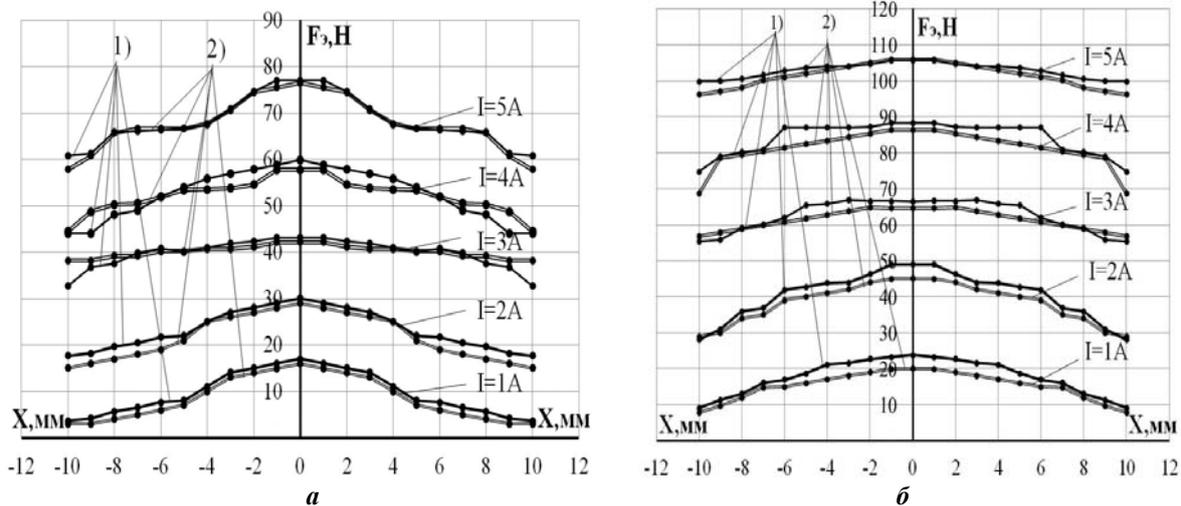


Рис. 4

Анализируя и сравнивая полученные характеристики $F_{\text{Э}}=f(x)$, приходим к выводу, что значения параметров тяговых характеристик для двигателя с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов значительно больше, чем с аксиальным. Расчёты показали, что расхождение максимальных значений параметров электромеханических тяговых характеристик между этими двигателями составляет 33%, расхождение минимальных значений электромеханических тяговых характеристик при крайнем положении бегуна (10 мм) составляет 37%, следовательно, жёсткости этих характеристик отличаются друг от друга (рис. 5).

Жёсткость тяговой характеристики [8] коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами на бегуне – это отношение разности выбранных значений электромеханической тяговой характеристики, развиваемой двигателем, к соответствующей разности перемещения бегуна по отношению к статору, то есть:

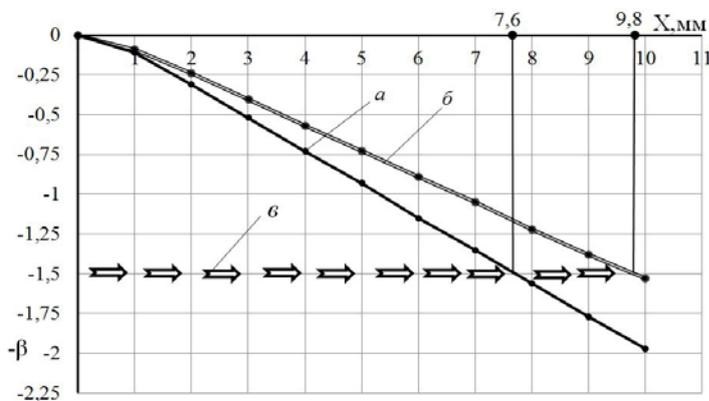


Рис. 5

Из графиков $F_{\vartheta}=f(x)$ (рис. 4) и $\beta=f(x)$ (рис. 5) видно, что более жёсткой является электромеханическая тяговая характеристика для двигателя с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

Для определения влияния жёсткости электромеханических характеристик на эффективность применения двигателей с различным направлением намагничивания постоянных магнитов были проведены экспериментальные исследования, связанные с величиной хода бегуна. Исследования проводились при массе бегуна $m=5$ кг и жёсткости тяговых характеристик $\beta=1,5$.

Результаты экспериментального исследования показали (рис. 5), что ход бегуна для двигателя с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов (кривая *в*) составил 7,6 мм, а для двигателя с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов – 9,8 мм.

Выводы. Сравнивая электромеханические тяговые характеристики коаксиально-линейных двигателей с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов и их жёсткость, можно сделать вывод, что более эффективным при одинаковых конструктивных и электрических параметрах статора, а также равных по массе магнитов, применённых при построении полюсов бегунов, является коаксиально-линейный двигатель с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов. Например, экспериментальные исследования показали, что ход бегуна двигателя с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов по сравнению с ходом перемещения бегуна с аксиальным направлением намагничивания при жёсткости $\beta=1,5$ эффективнее: разница составляет 22%, а энергетические затраты уменьшены на 30%.

Результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования физической модели коаксиально-линейного двигателя в данной работе показали, что предложенные конструктивные решения по исполнению бегуна с полюсами, постоянные магниты которых намагничены радиально по отношению к оси бегуна, позволяют разработать двигатели необходимой мощности для современных вибраторов, применяемых в строительной индустрии и других отраслях.

Из двух рассмотренных конструкций двигателей КЛД-ПМ более эффективна конструкция с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

1. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высшая школа, 1977. – 255 с.

2. Бондар Р.П. Електромеханічні характеристики коаксіально-лінійного синхронного вібратора установки для безтраншейної проходки горизонтальних свердловин // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 2. – С. 31 – 35.

3. Мартынов В.Д., Алешин Н.И., Морозов Б.П. Строительные машины и монтажное оборудование – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

4. Патент № 57743, Україна, МПК(2011.01), ЕО2D 7/00, ЕО2D 7/18(2006.01), ЕО2D 7/20(2006.01). Вібробуджувач // Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Сидора А.М., Срібний В.О. // Інтелектуальна власність. – 2011. – № 5.

$$\beta = (F_{i+1} - F_i) / (x_{i+1} - x_i).$$

Характер изменения жёсткости тяговых характеристик $\beta=f(x)$ исследуемых двигателей показан на рис. 5. Кривые $\beta=f(x)$ и их параметры были определены при исследовании электромеханических тяговых характеристик $F_{\vartheta}=f(x)$ (рис. 4). Для анализа были выбраны кривые $F_{\vartheta}=f(x)$ для двигателей с аксиальным (кривая *а*) и радиальным (кривая *б*) направлениями намагничивания постоянных магнитов с одинаковыми значениями тяговых усилий и, соответственно, при токовых нагрузках $I=4,3$ и $I=3$ А (рис. 4).

5. Патент № 93168, Україна, МПК (2011.01), H02K 33/00, H02K 41/025. Лінійний електродвигун зворотньо-поступального руху // *Барабаш В.А., Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С.* // Інтелектуальна власність. – 2011. – № 1.

6. Патент № 57744. Україна, МПК, E02D 7/20(2006.01). Пристрій для занурювання будівельних елементів // *Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Сидора А.М., Срібний В.О.* // Інтелектуальна власність. – 2011. – № 5.

7. *Смородінова М.И., Егоров А.И., Губанова Е.М.* и др. Свайные работы. – М.: Стройиздат, 1988. – 223 с.

8. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

9. www.vltar.ru, www.neomagnetism.com.

10. www.comsol.com.

УДК 621.313.33

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОАКСІАЛЬНО-ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА З АКсіАЛЬНИМ ТА РАДІАЛЬНИМ НАПРЯМКАМИ НАМАГНІЧУВАННЯ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

Голенков Г.М., канд.техн.наук, Аббасян Мохсен

Київський національний університет будівництва та архітектури,

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, 03680, Україна,

e-mail: mohsen12849@yahoo.com

Проведено аналіз електромеханічних тягових характеристик існуючих лінійних електричних машин зворотньо-поступального руху з постійними магнітами на вторинному елементі (бігуні). В роботі запропоновано випробувальний стенд і методики експериментального дослідження та комп'ютерного моделювання електромеханічних тягових характеристик коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами з аксіальним та радіальним напрямками їхнього намагнічування. Представлено результати комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження електромеханічних тягових характеристик, а також здійснено порівняльний аналіз характеристик двигунів, які досліджуються в даній роботі. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: коаксіально-лінійний двигун, постійні магніти, моделювання, експериментальні дослідження, тягові характеристики.

ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS COAXIAL-LINEAR MOTOR WITH AXIAL AND RADIAL DIRECTION OF MAGNETIZATION PERMANENT MAGNETS

G.M.Golenkov, Abbasian Mohsen

Kyiv National University of Construction and Architecture,

pr. Povitroflotskyi, 31, Kyiv, 03680, Ukraine,

e-mail: mohsen12849@yahoo.com

Analysis of electromechanical traction characteristics existing linear electrical machines with constant magnets on the secondary element (runner). In this paper, a testing stand and techniques of experimental research and computer modeling of electromechanical coaxial traction characteristics-linear motor with permanent magnets with axial and radial directions of magnetization. The results of computer simulation and experimental study of electro-traction characteristics, as well as the comparative analysis of these characteristics between the study, in this paper, engines. References 9, figures 5.

Key words: coaxial linear motor, the permanent magnets, modeling, experimental studies, traction characteristics.

1. *Bauman V.A., Bykhovskii I.I.* Vibratory machinery and construction processes. – Moskva: Vysshaya Shkola, 1977. – 255 с. (Rus)

2. *Bondar R.P.* Electromechanics characteristics of coaxially-linear synchronous vibrator of setting are for the trenchless drifting of horizontal mining holes // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2008. – № 2. – Pp. 31–35. (Ukr)

3. *Martynov V.D., Aleshin N.I., Morozov B.P.* Construction machines and mounting hardware. – Moskva: Mashinostroenie, 1990. – 352 p. (Rus)

4. Патент № 57743 Україна, IPC (2011.01), E02D 7/00, E02D 7/18 (2006.01), E02D 7/20 (2006.01). Vibrozbudzhuvach // *Bogaenko M.V., Golenkov G.M., Golub V.P., Popkov V.S., Sidor A.M., Sribnyi V.O.* // Інтелектуальна власність. – 2011. – № 5. (Ukr)

5. Патент № 93168 Україна, IPC (2011.01), H02K 33/00, H02K 41/025. Лінійний електродвигун зворотньо-поступального руху // *Барабаш В.А., Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С.* // Інтелектуальна власність. – 2011. – № 1. (Ukr)

6. Патент № 57744 Україна, IPC, E02D 7/20 (2006.01). Пристрій для занурювання будівельних елементів // *Богаєнко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Сидора А.М., Срібний В.О.* // Інтелектуальна власність. – 2011. – № 5. (Ukr)

7. *Смородінова М.И., Егоров А.И., Губанова Е.М.* etc. Piling works. – Moskva: Stroizdat, 1988. – 223 p. (Rus)

8. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* The general course of the electric drive. – Moskva: Energoizdat, 1981. – 576 p. (Rus)

9. www.vltar.ru, www.neomagnetism.com.

10. www.comsol.com

Надійшла 10.06.2013
Остаточний варіант 14.01.2014