

УДК 621.313.33

Г. М. ГОЛЕНКОВ, АББАСЯН МОХСЕН

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ КОАКСИАЛЬНО–ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ И РАДИАЛЬНЫМ ВЕКТОРОМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Представлены конструктивные решения коаксиально–линейного двигателя с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов и его модель в виде электрической схемы замещения. Проведён сравнительный анализ векторных диаграмм напряжений и токов при резонансной, а также до и после резонансной частоты. Предложенные электрические схемы замещения и векторные диаграммы позволяют характеризовать энергетические параметры и рабочие характеристики этих двигателей при различных частотах работы вибрационных систем.

**Ключевые слова:** коаксиально – линейный двигатель с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов, схема замещения, векторная диаграмма, вибрационная система.

**Введение.** В настоящее время в качестве привода рабочего органа вибрационных систем используются коаксиально – линейные двигатели с аксиальным (*ax*) и радиальным (*rad*) вектором намагничивания постоянных магнитов (КЛД-ПМ), изготовленных из редкоземельных материалов Nd-Fe-B [5,6]. В этих работах предложены конструктивные решения физических моделей двигателей с “*ax*” и “*rad*” вектором намагничивания постоянных магнитов, а также эквивалентные механические схемы вибрационных систем КЛД-ПМ [7,1].

**Анализ основных достижений.** Предложенные модели в виде электрических схем замещения КЛД-ПМ недостаточно полно отражают физические процессы, характеризующие работу двигателей. Например, процесс получения противо – ЭДС за счёт вынужденных колебаний вторичного элемента (бегуна) с постоянными магнитами. Не был дан сравнительный анализ векторных диаграмм при различных частотах работы вибрационных систем КЛД-ПМ, а именно при резонансной частоте, до и после резонансной частоты. Словом, не была дана энергетическая характеристика вибрационных систем КЛД-ПМ до и после резонансной частоты по сравнению с резонансной.

**Цель исследований.** Моделирование коаксиально – линейного двигателя с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов в виде электрической схемы замещения и проведение сравнительного анализа векторных диаграмм напряжений и токов при резонансной частоте, а также до и после резонансной частоты.

**Материал исследований.** В табл. 1 указаны конструктивные размеры КЛД-ПМ. На рис.1 схематично изображена физическая модель вибрационной системы, приводом рабочего органа которой является коаксиально – линейный двигатель с постоянными магнитами, который включает: 1 – татор; 2 – магнитопровод статора; 3 – обмотки статора; 4 – пружины; 5 – бегун; 6 – стержень бегуна; 7 – постоянные магниты; 8 – концентраторы магнитного потока (полюса); 9 – дополнительную массу.

Физическая модель КЛД-ПМ предложенная для исследования в данной работе (см. рис.1) с использованием материалов источников [3], может быть представлена в виде электрической схемы

замещения двигателя при последовательном соединении элементов  $R_1, L, R_0$  и  $L_0$ , (рис. 2), где ( $S-N$ ) – постоянные магниты.

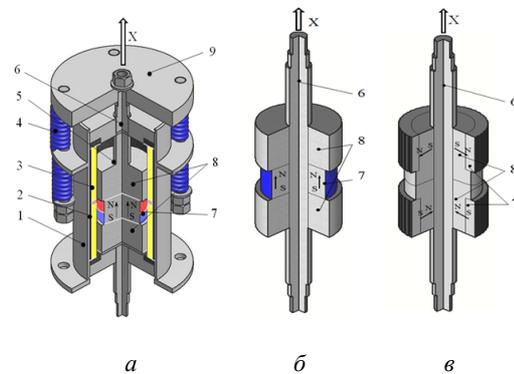


Рис. 1 – Схематичное изображение коаксиально – линейного двигателя: а – общий вид двигателя; б – бегун с аксиально намагниченными постоянными магнитами (ПМ-А); в – бегун с постоянными магнитами намагниченными радиально (ПМ-Р)

Таблица 1– Конструктивные размеры КЛД-ПМ

№	Наименование	Размеры
1	Внешний и внутренний диаметры магнитопровода статора, мм (стальная проволока, $d=1$ мм)	$D_s = 96$ ; $d_s = 86$
2	Длина магнитопровода статора, мм	$L_s = 152$
3	Внешний и внутренний диаметры катушки статора, мм	$D_k = 86$ ; $d_k = 76$
4	Ширина катушки, мм	$b_k = 76$
5	Сечение провода обмотки статора, мм <sup>2</sup>	$\Delta S = 0,724$
6	Число витков в катушке статора	$w_s = 245$
7	Общая длина проводника катушек статора, м	$l_s = 125$
8	Конструктивные размеры концентраторов магнитного потока (полюсов), мм	$D_{п} = 60$ ; $d_{п} = 20$ ; $b_{п} = 38$
9	Площадь активной части полюсов бегуна, мм <sup>2</sup>	$S_{мп} = 15072$
10	Полосное деление, мм	$\tau = 56$
11	Масса магнитопровода статора, кг	$m_c = 1,8$

© Г. М. Голенков, Аббасян Мохсен, 2015

На основании схемы замещения (см.рис.2, а) составлено следующее дифференциальное уравнение:

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + u_s - e_{ax}; (-e_{rad}). \quad (1)$$

Уравнение напряжений для схемы замещения (см.рис.2, б) в комплексной форме примет вид:

$$\underline{U} = R\underline{I} + jX\underline{I} + \underline{U}_{sm}(-\underline{E}_{sm}), \quad (2)$$

где  $\underline{U}_{sm}; (-\underline{E}_{sm}) = -\underline{E}_s - \underline{E}_{ax}; (-\underline{E}_{rad})$  – векторная сумма ЭДС двигателя КЛД-ПМ; здесь:  $(-\underline{E}_s)$  – ЭДС, наводимая потоком в сердечнике;  $-\underline{E}_{ax}; (\underline{E}_{rad})$  – ЭДС, возникающая при возвратно – поступательном

движении бегуна, соответственно с  $ax$  и  $rad$  вектором намагничивания постоянных магнитов.

Комплексное значение ЭДС имеет вид:

$$-\underline{E}_s = \underline{U}_s = j2\pi f_i \cdot w_s \cdot \Phi_{max} / \sqrt{2} = j4,44 f_i \cdot w_s \cdot B_s \cdot \Delta S_s, \quad (3)$$

где  $B_s$  – амплитудные значения магнитной индукции при прохождении переменного тока в обмотках статора КЛД-ПМ соответственно с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов, Тл [2];  $\Delta S_s = \pi \cdot d_s \cdot l_s$  – активная площадь магнитопровода статора, м<sup>2</sup> (см. табл.1).

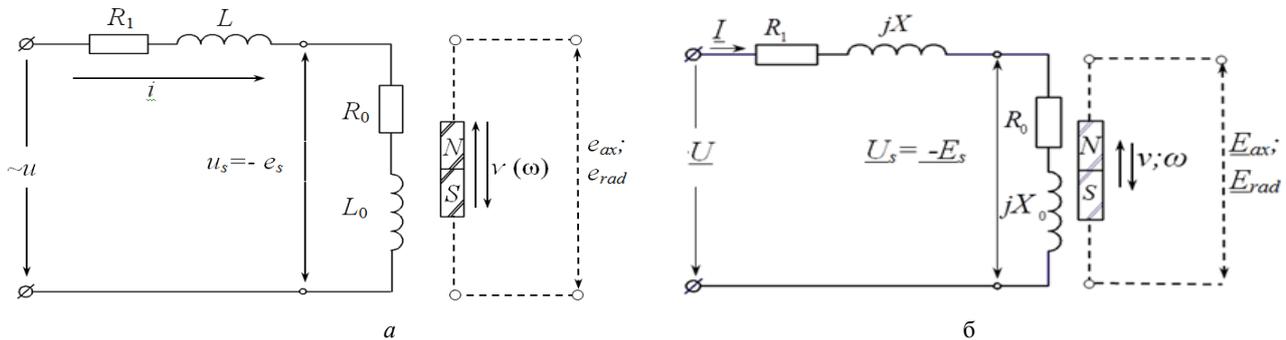


Рис. 2 – Электрическая схема замещения КЛД-ПМ:  
а – при последовательном соединении элементов R, L;  
б – в комплексной форме

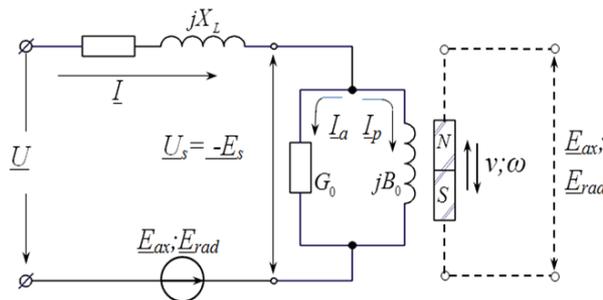


Рис. 3 – Эквивалентная электрическая схема замещения двигателя КЛД-ПМ со смешанным соединением элементов

Комплексные значения ЭДС, возникающей при возвратно – поступательном движении бегуна с магнитами, векторы намагничивания которых направлены аксиально и радиально, соответствуют следующим выражениям:

$$\underline{E}_{ax} = jE_{ax} / \sqrt{2} = j \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot B_{ax} \cdot w_s \cdot D_{ak} \cdot x_{axi} \cdot f_i; \quad (4)$$

$$\underline{E}_{rad} = jE_{rad} / \sqrt{2} = j \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot B_{rad} \cdot w_s \cdot D_{ak} \cdot x_{radi} \cdot f_i, \quad (5)$$

где  $B_{ax}$  и  $B_{rad}$  – амплитудные значения магнитной индукции в зазоре КЛД-ПМ соответственно с “ax” и “rad” вектором намагничивания постоянных магнитов, Тл [2];

$w_s$  – число витков в обмотках статора;

$D_{ak} = (D_k + d_k) / 2$  – среднее значение диаметра катушек обмоток статора (см.табл.1), м;

$x_{axi}$  и  $x_{radi}$  – амплитуда колебания бегунов КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов, м [2].

Эквивалентная электрическая схема замещения КЛД-ПМ со смешанным соединением элементов в комплексной форме примет вид, показанный на рис. 3.

На схеме (см. рис.3) показаны электрические параметры двигателя КЛД-ПМ в комплексной форме, действующие значения которых представлены в виде выражений:  $G_0 = (P_m + P_{cm}) / U_s^2$  – активная проводимость контура намагничивания, Ом<sup>-1</sup>, где  $P_m = R_l I^2$  – потери в меди;  $P_{cm} = K_{cm} P_{1,0/50} (f_i/50)^\beta B_c^2 m_c$  – потери в сердечнике (стали) [4];  $B_0 = I_p / U_s$  – реактивная (индуктивная) проводимость контура намагничивания Ом<sup>-1</sup>,  $I_p = (I^2 - I_a^2)^{1/2}$  – реактивный (индуктивный) ток контура намагничивания, А;  $I_a = P_{cm} / U_s$  – активный ток контура намагничивания, А;  $I$  – действу-

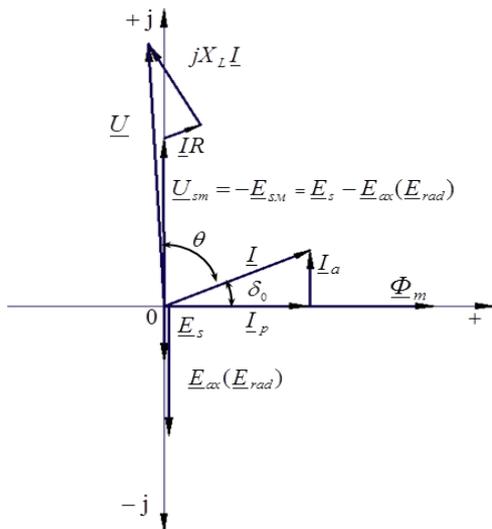


Рис. 4 – Векторная диаграмма КЛД-ПМ

ище значение тока в обмотках статора, А.

**Результаты исследований.** При построении совмещённой векторной диаграммы токов и напряжений КЛД-ПМ (рис.4) используем выражение (2) и эквивалентную электрическую схему замещения КЛД-ПМ со смешанным соединением элементов (рис. 3), где угол  $\delta_0$  показывает, что вектор тока  $\underline{I}$  отстаёт по фазе от вектора напряжения  $\underline{U}_s$ ; угол  $\delta_0 = 90 - \theta$  называется углом потерь [3]. Например, расчётные векторные диаграммы (рис. 5 и рис. 6) отражают диаграммы напряжений и токов для двигателей, предложенных для исследования (см. рис. 1), а именно КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов.

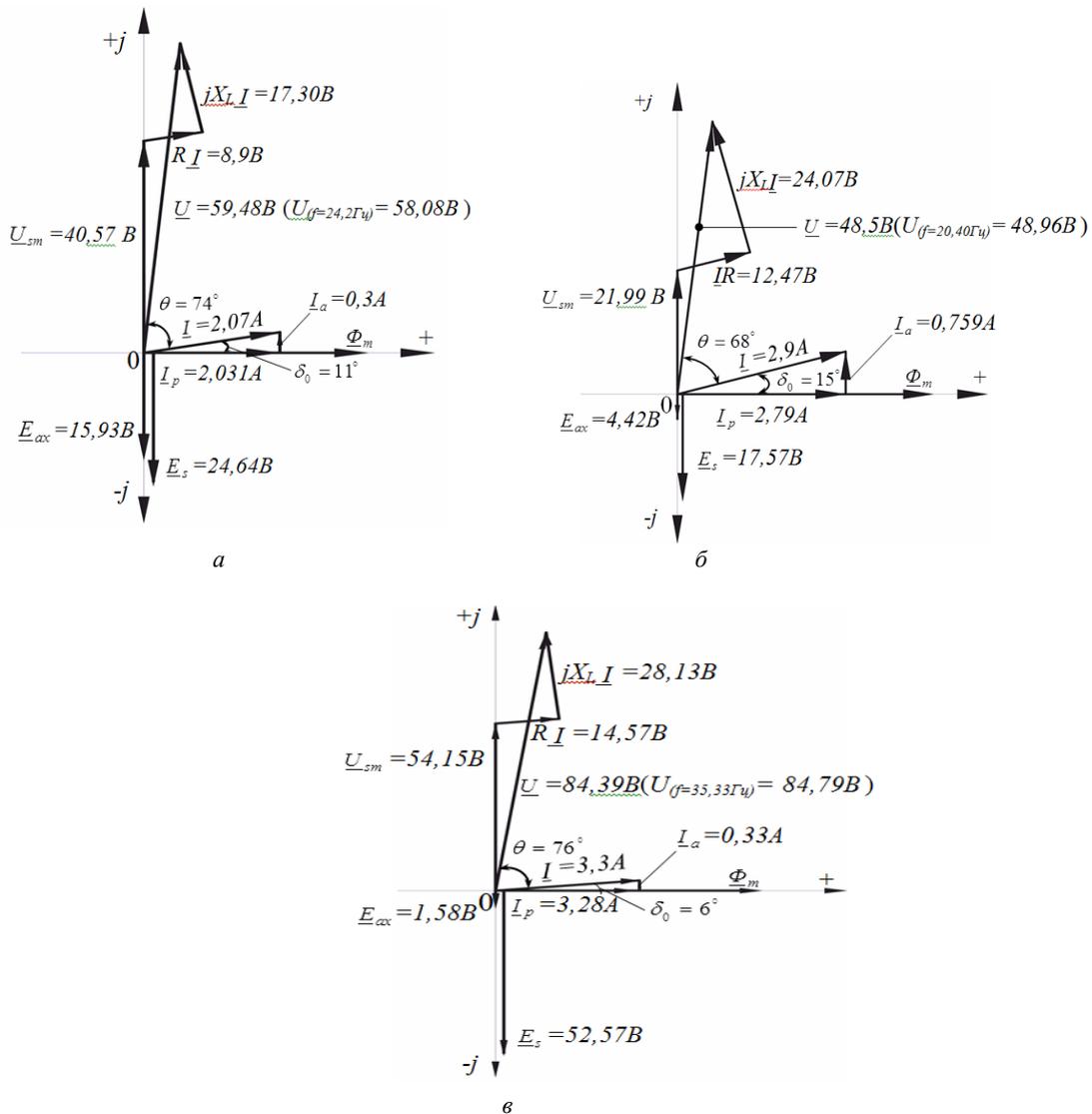


Рис. 5 – Векторные диаграммы КЛД-ПМ-А  
 а – при резонансной частоте ( $f=24,20$  Гц);  
 б – до резонансной частоты ( $f=20,40$  Гц);  
 в – после резонансной частоты ( $f=35,33$  Гц)

Причём подводимое напряжение  $U$  к обмоткам статора двигателей при заданных частотах  $f$  определяется по закону регулирования  $U/f = \text{const}$ .

При расчёте электрических параметров и построении векторных диаграмм при различных частотах (см. рис.5 и рис.6) двигателей КЛД-ПМ использовались выражения из источника [2], конструктивные параметры моделей этих двигателей (см. табл.1), а также выражения для определения значений электрических параметров при описании электрических схем замещения КЛД-ПМ (см. рис.3).

Напряжение, подводимое к обмоткам статора двигателя после преобразователя частоты, определялось по закону регулирования  $U/f = \text{const}$ .

Анализируя векторные диаграммы напряжений и токов двигателей КЛД-ПМ (см. рис.5 и рис.6), отметим, что значение токов  $I$  в обмотках статора при резонансной частоте  $f_0$  вибрационной системы меньше, чем до и после этой резонансной частоты, а значение напряжений  $U$  между заданными и расчётными значениями незначительное и составляет в пределах  $\Delta U = (0,5 \div 4) \%$ .

Также из векторных диаграмм видно, что при резонансной частоте  $f = 24,20$  Гц сила тока для КЛД-ПМ-А  $I = 2,07$  А, а для КЛД-ПМ-Р  $I = 1,40$  А, то есть энергетическая эффективность двигателя КЛД-ПМ-Р на 34,4% выше, чем двигателя КЛД-ПМ-А.

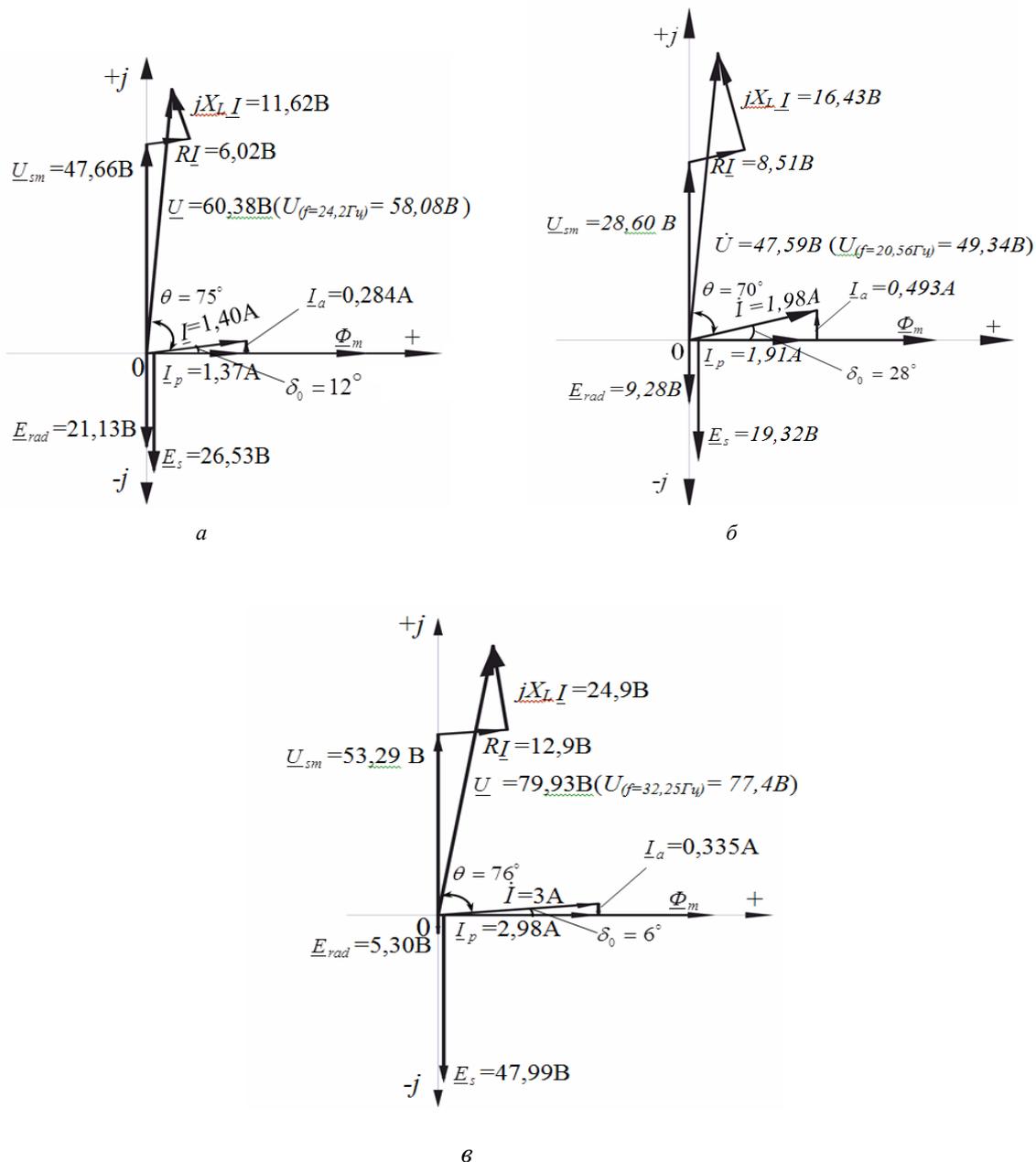


Рис. 6 – Векторные диаграммы КЛД-ПМ с радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов  
 а – при резонансной частоте ( $f=24,20$  Гц);  
 б – до резонансной частоты ( $f=20,56$  Гц);  
 в – после резонансной частоты ( $f=32,55$  Гц).

**Выводы.** Представленная модель коаксиально – линейного двигателя с аксиальным и радиальным вектором намагничивания постоянных магнитов в виде электрической схемы замещения и проведенный сравнительный анализ векторных диаграмм напряжений и токов при резонансной, до и после резонансной частоты позволяет характеризовать энергетические параметры и рабочие характеристики при различных частотах работы вибрационных систем, а также определить эффективность применения КЛД-ПМ-Р по сравнению с КЛД-ПМ-А.

**Список литературы:** 1. Бондар Р.П. Энергетичні характеристики вібратора з приводом від лінійного двигуна з неявнополюсним якорем. / Р.П. Бондар // Електротехніка і електромеханіка. Національний технічний університет «ХПІ». Харків, 2014. №5. – С. 19 – 24. 2. Голенков Г.М. Моделирование работы коаксиально - линейных двигателей с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов при динамическом режиме. / Г.М. Голенков, М. Аббасян // Електротехніка і електромеханіка. Харків. – 2014. – №6. – С. 21 – 29. 3. Ионкин П.А и др., Теоретические основы электротехники: [учебник для студентов электромеханических, энергетических и радиотехнических вузов и факультетов.] / П.А. Ионкин, Н.А. Мельников, А.И. Даревицкий. – М.: Издательство «высшая школа», 1965. – 735 с., ил. 4. Кацман М.М. Расчет и конструирование электрических машин: [Учеб. пособие для техникумов].- М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с., ил. 5. 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 // Індивідуальна власність – 2011. – № 5. 6. Патент № 93168, Україна, МПК (2011.01), H02K 33/00, H02K 41/025. Лінійний електродвигун зворотно – поступального руху // Барабаш В.А, Богаєнко М.В, Голенков Г.М, Голуб В.П, Попков В.С // Індивідуальна власність – 2011. – № 1.7. Хитерер М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: [учебное пособие по специальности «Электромеханика», «Электропривод и автоматика»] / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. - Санкт-Петербург: Издательство «Корона принт», 2004. – 368 с., ил.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bondar, R.P. "Energetychni charakterystyky vibratora z pryvodom vid liniynogo dvyguna z neyavnopolyusnym yakorem." *Elektrotehnika i elektromehanika*. No. 5. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 19–24. Print. 2. Golenkov, G.M., and Abbasian M. "Modelirovanie raboty koaksial'no-linejnyh dvigatelej s aksial'nym i radial'nym napravlenijami namagnichivaniya postojannyh magnitov pri dinamicheskom rezhime." *Elektrotehnika i elektromehanika*. No. 6. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 21–29. Print. 3. Ionkin, P.A, et al., "Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki". Moskva: Vysshaja shkola, 1965. Print. 4. Kacman, M.M., "Raschet i konstruirovaniye jelektricheskikh mashin". Moskva: Jenergoatomizdat, 1984. Print. 5. Bogayenko, M.V, et al. "Vibrozbudzhuvach". Vol. EO2D 7/00, EO2D 7/18 (2006.01), EO2D 7/20 (2006.01). Patent No. 57743. Ukrayina. 2011. Print. 6. Barabash, V.A, et al. "Liniyniy elektrodvyygun zvorotno-postupalnogo ruhu". Vol. H02K 33/00, H02K 41/025. Patent No. 93168. Ukrayina. 2011. Print. 7. Hiterer, M.Ja., and I.E. Ovchinnkov "Sinhronnye jelektricheskije mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizhenija". Sankt-Peterburg: Korona print, 2004. Print.

«Сведения об авторах / About the Authors»

**Голенков Геннадий Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, доцент кафедры электротехники и электропривода; тел.: (095) 488-50-31; e mail: [gennadiymikhaylovich@mail.ua](mailto:gennadiymikhaylovich@mail.ua).

**Golenkov Gennadij Mihajlovich** – candidate of technical sciences, Docent, Kyiv National University of Construction and Architecture, associate professor of the Department of Electrical Engineering and electromechanic; tel.: (095) 488-50-31; e mail: [gennadiymikhaylovich@mail.ua](mailto:gennadiymikhaylovich@mail.ua).

**Аббасян Мохсен** – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, аспирант кафедры электротехники и электропривода; тел.: (093) 898-14-98; e mail: [mohsenabbasian1978@gmail.com](mailto:mohsenabbasian1978@gmail.com).

**Abbasian Mohsen** – Kyiv National University of Construction and Architecture, Postgraduate Student at the Department of electrical and electric; tel.: (093) 898-14-98; e mail: [mohsenabbasian1978@gmail.com](mailto:mohsenabbasian1978@gmail.com).