

УДК 681.3:519.711.3:517.958:621.313

А. В. ЖИЛЬЦОВ, Д. С. СОРОКІН

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВИХРОВИХ СТРУМІВ НА ДИНАМІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛІНІЙНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

На основі розробленої вісесиметричної інтегро-диференційної математичної моделі нестационарного електродинамічного процесу в електромеханічній системі з постійними магнітами та алгоритму сумісного чисельного розв'язку електромагнітної та механічної задачі було проведено перевірку на адекватність математичної моделі шляхом порівняння з результатами фізичного експерименту. Розглянувши різні варіанти конструкції було досліджено вплив вихрових струмів на динамічні та енергетичні характеристики електромеханічної системи.

Ключові слова: коаксіально-лінійний двигун, постійні магніти, нестационарний процес, метод інтегральних рівнянь, вихрові струми

На основе разработанной осесимметричной интегро-дифференциальной математической модели нестационарного электродинамического процесса в электромеханической системе с постоянными магнитами и алгоритма совместного численного решения электромагнитной и механической задачи была проведена проверка на адекватность математической модели путем сравнения с результатами физического эксперимента. Рассмотрев различные варианты конструкции было исследовано влияние вихревых токов на динамические и энергетические характеристики электромеханической системы.

Ключевые слова: коаксиально-линейный двигатель, постоянные магниты, нестационарный процесс, метод интегральных уравнений, вихревые токи

Purpose. The study of electromechanical systems of reciprocating motion was most often limited to devices with nonconducting or non-ferromagnetic elements of the structure and, in most cases, were of an applied nature. The analysis shows that in some problems that have been solved, the features of the operation of linear electromechanical systems are not fully taken into account. Within the framework of the research, methods for calculating the associated non-stationary electromagnetic and mechanical processes in systems with massive ferromagnetic elements with axial symmetry under various operating conditions have been developed; In the presence of permanent magnets as non-consuming sources of magnetic field. On the basis of the stepping method, an algorithm for calculating the non-stationary electrodynamic process in an electromechanical system with axial symmetry has been developed. This algorithm makes it possible to transform a nonlinear problem with respect to the speed of motion of the armature, the density of the eddy currents in the cross section of conductors, and the density of the magnetization currents at the boundary of the magnetic circuits into two linear ones shifted in time. The algorithm was implemented in the FORTRAN programming language, the reliability of the obtained results was proved by comparison with the models built in the Comsol Multiphysics 3.5a software package and the adequacy of mathematical models by comparison with previously published experimental research results. A study was conducted to identify the effect of eddy currents in moving massive ferromagnetic elements of the electromagnetic system on the electrodynamic process. The damping effect of eddy currents was shown, which leads to a decrease in the amplitude of the natural oscillations of the system. The calculated heat losses do not exceed 11%. A decrease in the amplitude of the higher harmonics of the current is shown, which affects the power quality indicators. As a practical application, the electromechanical system of reciprocating action is proposed to be used as a drive for the crystallizer of a continuous casting machine to ensure the optimal law of motion of the mold.

Keywords: coaxial motor, permanent magnets, transient process, the method of integral equations, eddy currents

Вступ. Визначення основних характеристик будь-якої електричної машини пов'язано з аналізом електромагнітних процесів, що в ній протікають. Це передбачає розв'язання крайових задач, наприклад, для потенціалів електромагнітного поля, а якщо аналізуються і електромеханічні процеси, то сумісно з ними і рівнянь механіки. Їх аналітичне рішення можна отримати тільки в найпростіших випадках. На практиці доводиться виконувати розрахунки характеристик електромагнітного поля в електромагнітних системах зі складною геометрією границі, які можуть містити масивні феромагнітні рухомі елементи, і в даному випадку найбільш ефективним є методи розв'язку крайових задач обчислювальними методами.

Електромеханічні процеси, які протікають в електромеханічних системах зворотно-поступальної дії після підключення статорної обмотки до мережі, описуються складними системами інтегро-диференційних рівнянь (інтегральними за просторовими змінними, диференційними за часом) [1, 2] розв'язок яких можливий лише чисельними методами [3, 4].

Різноманітність конструктивних рішень лінійних електричних машин спричиняє необхідність аналізу електромеханічних процесів в них з метою подальшого визначення оптимальних геометричних та електрофізичних параметрів, режимів їх роботи. У загальному випадку це потребує вирішення тривимірних крайових задач для рівнянь Максвелла в

необмеженій неоднорідній області, що містить геометрично складні феромагнітні і провідні тіла, рівнянь руху:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}, \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{\delta} = 0, \vec{B} = \mu \vec{H},$$

$$\vec{\delta} = \gamma (\vec{E} + [\vec{V}, \vec{B}]), \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}_2 + \vec{F}_{em} + m \vec{g} + \vec{F}_3 + \vec{F}_0. \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V}. \quad (3)$$

Тут \vec{E} – напруженість електричного поля, В/м; \vec{H} – напруженість магнітного поля, А/м; γ – питома електропровідність, См/м; μ – абсолютна магнітна проникність середовища, Гн/м; \vec{B} – магнітна індукція, Тл; $\vec{\delta}$ – густина струму, А/м³; \vec{V} – швидкість руху якоря, м/с; m – маса якоря, кг; \vec{g} – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²; \vec{r} – радіус-вектор положення якоря, м; t – час, с; \vec{F}_2 – сила пружності пружин, до яких прикріплено якір лінійного двигуна, Н; k – коефіцієнт жорсткості пружин, Н/м; \vec{F}_{em} – сила, що діє на якір з боку електромагнітного поля, Н; \vec{F}_3 – зовнішня сила, що діє на якір

(навантаження на двигун), Н; $\vec{F}_0 = -\alpha \vec{V}$ – демпферна сила, Н; α – коефіцієнт демпфування, кг/с.

У попередніх роботах [1-4] авторами на основі методу інтегральних рівнянь було розроблено математичні моделі нестационарного електродинамічного процесу для розрахунку миттєвих значень густини струмів намагнічування на границі феромагнітних тіл, густини вихрових струмів в перерізі масивних магнітопроводів, розглянуто різні режими роботи (режим струмів, режим напруги), розглянуто різні варіанти конструкції (зі струмами на якорі та з постійними магнітами). Було проведено чисельну дискретизацію отриманих інтегральних та інтегро-диференціальних рівнянь [3]. Запропоновано алгоритм чисельного розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь та показана достовірність отриманих його за допомогою результатів [4].

Метою даного дослідження є перевірка запропонованих моделей на адекватність шляхом порівняння з фізичним експериментом та аналіз впливу вихрових струмів на електромеханічний процес у електродинамічній системі зворотньо-поступальної дії.

Результати досліджень. Для перевірки адекватності розроблених математичних моделей нестационарного електродинамічного процесу в електромеханічній системі зворотньо-поступального руху було проведено порівняння результатів розрахунків з опублікованими результатами фізичного експерименту [7, 8].

Порівняння проводилось з моделлю коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами, вектор намагнічування яких направлений вздовж вісі симетрії системи z (рис 1).

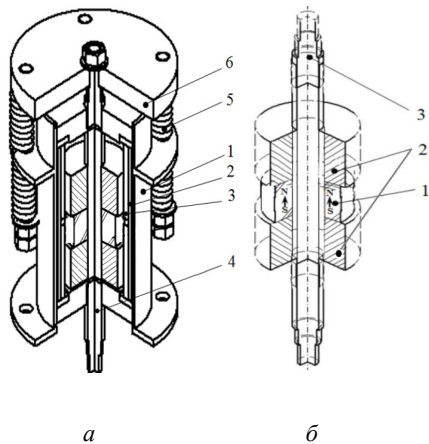


Рис. 1 – Схематичне зображення коаксіально-лінійного двигуна: а – загальна конструкція; б – бігун з постійними магнітами, що намагнічені аксіально;

На рис. 1, а позначено позиції, 1 – статор; 2 – магнітопровід статора; 3 – обмотка статора; 4 – бігун; 5 – пружини; б – додаткова маса; на рис. 1, б, 1 – постійні магніти, 2 – концентратори магнітного потоку; 3 – стрижень бігуна. Конструктивні розміри параметрів фізичної моделі коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами наведені в табл. 1

Відносна магнітна проникливість для повітряного середовища $\mu_r = 1,0$; відносна магнітна проникливість для бігуна центральної частини $\mu_r = 1,0$; відносна магнітна проникливість магнітопроводів статора $\mu_r = 100,0$; відносна магнітна проникливість постійних магнітів $\mu_r = 1,06$; Залишкова магнітна індукція постійних магнітів $B_r = 1,2$ Тл.

Моделювання електромеханічної характеристики проводилось при струмі в обмотці статора $I = 4$ А що відповідає густині струму $\delta = 6,29$ А/мм².

Таблиця 1 – Конструктивні розміри параметрів фізичної моделі коаксіально-лінійного двигуна

№	Найменування	Розміри
1	Зовнішній діаметр магнітопроводу статора (стальний дріт, $d = 1$ мм)	$D = 96$
2	Товщина магнітопроводу статора, мм	$h_{mn} = 5$
3	Довжина магнітопроводу статора, мм	$L = 152$
4	Зовнішній діаметр котушки статора, мм	$D = 86$
5	Ширина котушки, мм	$b_k = 73$
6	Товщина струмового слою статора, мм	$h_{mc} = 5$
7	Переріз дроту обмотки статора, мм ²	$\Delta s = 0,635$
8	Кількість витків в котушці статора	$W = 350$
9	Немагнітний зазор між магнітопроводом статора та бігуном, мм	$\delta = 7$
10	Конструктивні розміри концентраторів магнітного потоку, мм	$D = 60$; $d = 20$; $b_n = 40$
11	Маса постійних магнітів, кг	$m_A = 0,51$
12	Загальна довжина магнітної системи бігуна, мм	$L_\partial = 112$
13	Полусні ділення, мм	$\tau = 56$

Порівняння розрахованих електромеханічних характеристик з експериментальними наведено на рис. 2.

Порівняння результатів експериментальних досліджень [8] з чисельними розрахунками показало що середньоквадратичне відхилення не перевищує 5%, що дає змогу зробити висновок про адекватність запропонованої математичної моделі нестационарного електродинамічного процесу.

Виготовлення елементів конструкції коаксіально-лінійного двигуна з шихтованої сталі є трудомісткою технологічною задачею [1-3]. Ізольовані листи електротехнічної сталі потрібно розташовувати перпендикулярно напрямку струмів в котушках статора, що робить процес виготовлення складним та зменшує механічну міцність конструкції. Тому актуальним постає завдання моделювання режимів роботи коаксіально-лінійного двигуна з масивними феромагнітними елементами.

Для аналізу впливу вихрових струмів в перерізі масивних елементів конструкції електромеханічної системи на електродинамічний процес проводилось порівняння роботи електромеханічної системи зворотньо-поступальної дії з шихтованим та масивним магнітопроводами за рівності інших параметрів.

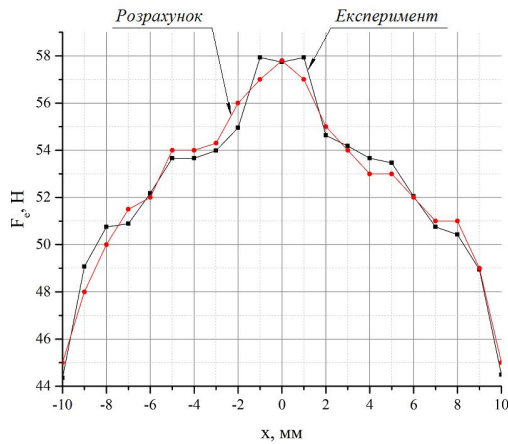


Рис. 2 – Електромеханічна характеристика коаксально-лінійного двигуна з постійними магнітами

Для електромеханічної системи, що наведена на рис. 3 проводиться розрахунок нестационарного електродинамічного процесу з використанням математичної моделі та алгоритму запропонованих раніше [2, 4]. Електрофізичні параметри матеріалів, з яких складається система наведені у табл. 2.

Меридіанний переріз та лінійні розміри системи наведені на рис. 4.

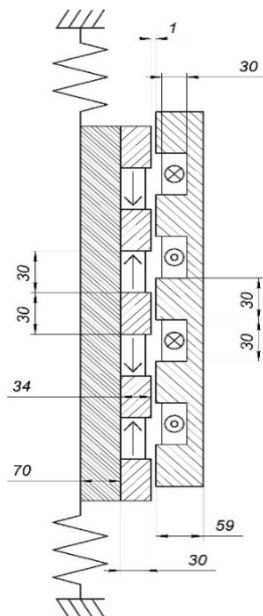


Рис. 4 – Меридіанний переріз електромеханічної системи

Моделювання проводилось при заданому законі зміни напруги на обмотці статора.

$$u(t) = U_m \sin(\omega t)$$

В такому разі миттєве значення струму в котушках статора є невідомим і розраховується в процесі розв'язку системи інтегральних та інтегродиференціальних рівнянь разом з густиною поверхневих струмів намагніченості на границі феромагнетиків та густиною вихрових струмів у перерізі масивних тіл.

Розрахунки показали (рис. 5), що для системи з

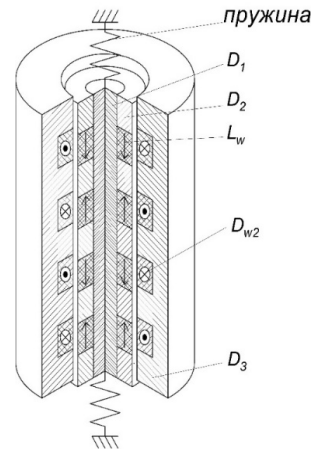


Рис. 3 – Спрощена схема електромеханічної системи зворотньо-поступальної дії

Таблиця 2 – Електрофізичні параметри матеріалів, з яких складається електромеханічна система

Позначення	Параметр	Значення
D_1	Питома провідність	$\gamma = 58.1 \cdot 10^6$ См/м
	Відносна магнітна проникливість	$\mu = \mu_0$
D_2	Питома провідність	$\gamma = 2.5 \cdot 10^6$ См/м
	Відносна магнітна проникливість	$\mu = 100\mu_0$
L_w	Коерцитивна сила	$915 \cdot 10^3$ А/м
	Залишкова намагніченість	$Br = 1.26$ Тл
	Відносна магнітна проникливість	$\mu = 1.06\mu_0$
D_3	Питома провідність	$\gamma = 1.8 \cdot 10^2$ См/м
	Відносна магнітна проникливість	$\mu = 100\mu_0$
D_w	Питомий опір	$r_0 = 0.0172 \cdot 10^{-6}$ Ом мм ² /м
	Площа поперечного перерізу провідника	$S = 1.54 \cdot 10^{-6}$ м ²
	Кількість витків	$w = 490$
	Напруга	$U_m = 23$ В
	Частота	$f = 0.5$ Гц
	Коефіцієнт жорсткості	$k = 654000$ Н/м
	Коефіцієнт в'язкого тертя	$\alpha = 15.0$ м ² /с
	Кількість пар полюсів	$2p = 22$
	Маса якоря	$m = 2000$ кг

непровідним магнітопроводом наявне накладання власних коливань масивного якоря та вимушених коливань під дією електромагнітних сил. Наявність вихрових струмів у перерізі масивних провідників виступає у ролі демпфера зменшуючи амплітуду власних коливань якоря. Додатково проводилось дослідження впливу вихрових струмів на струм в обмотці статора (рис. 6).

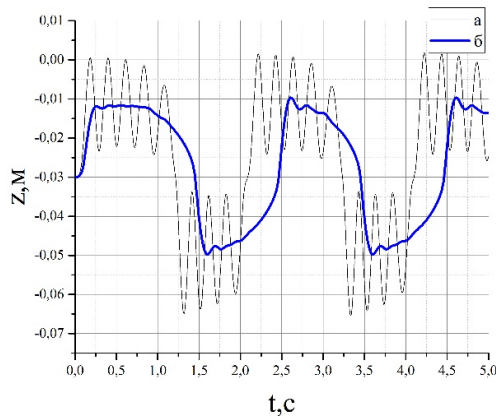


Рис. 5 – Графік залежності положення якоря коаксіально-лінійного двигуна від часу: *a* – без врахування впливу вихрових струмів; *б* – з вихровими струмами

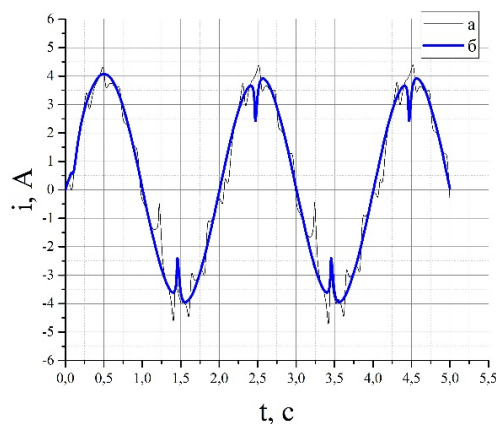


Рис. 6 – Графік залежності струму в котушках коаксіально-лінійного двигуна від часу: *a* – без врахування впливу вихрових струмів; *б* – з вихровими струмами

Наявність в котушках, для системи з шихтованим магнітопроводом, постійної складової струму та вищих гармонік кратних до основної веде за собою погіршення показників якості електроенергії в мережі, до якої підключено пристрій та призводить до необхідності установки додаткових фільтрів. А це, в свою чергу, призводить до збільшення затрат на виробництво та обслуговування обладнання та ускладнить конструкцію. Графік струму для системи з масивним магнітопроводом більш гладкий, з меншим числом вищих гармонік. Це дає змогу зродити висновки про кращі показники якості електроенергії при роботі коаксіально-лінійного двигуна з масивним магнітопроводом.

Через наявність в конструкції масивних елементів постає питання теплових втрат та впливу вихрових струмів на загальну потужність електромеханічної системи (рис. 7). Аналіз показав, що доля потужності теплових втрат в загальній потужності системи не перевищує 11 % (рис. 8).

Пікові значення теплових втрат пов'язані з наявністю постійних магнітів. Через велику швидкість руху їх вздовж нерухомого статора в провідних елементах статора виникають короточасні вихрові струми теплової дії яких і відображено на графіку

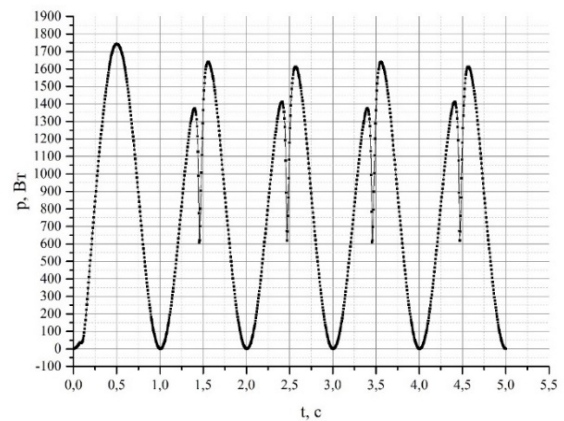


Рис. 7 – Графік залежності миттєвого значення повної потужності коаксіально-лінійного двигуна від часу

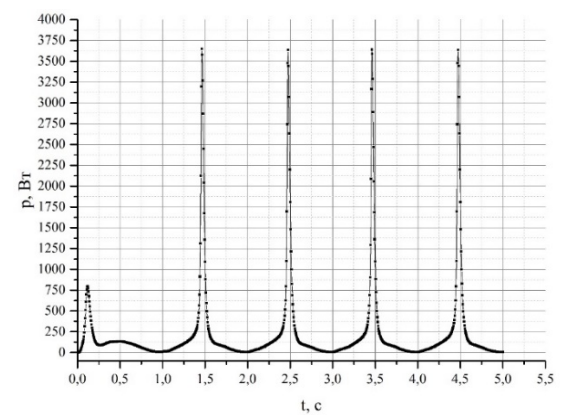


Рис. 8 – Графік залежності потужності теплових втрат від часу

Висновки.

1. Порівняння результатів розрахунків статичного режиму роботи коаксіально-лінійного двигуна з експериментальними даними дало середньоквадратичну похибку не більше 5 %, що свідчить про адекватність розроблених математичних моделей.

2. Аналіз впливу вихрових струмів на загальний електродинамічний процес показав, що вихрові струми виконують роль демпфера, зменшуючи амплітуду власних коливань системи. Також зменшення амплітуди власних коливань веде за собою зменшення амплітуди відмінних від основної гармонік струму в котушці статора, що покращує показники якості електроенергії в мережі, де працює пристрій. При цьому середнє за період значення потужності теплових втрат не перевищує 11 % загальної потужності пристрою.

Список літератури:

1. Zhiltsov A. Mathematical modeling of nonstationary electromechanical processes in coaxial-linear engine / A. Zhiltsov I. Kondratenko, D. Sorokin // ECONFTECHMOD, Lublin-Lviv-Cracow. – 2012. – vol.12, no. 2. – pp. 69-73.
2. Жильцов А.В. Математическое моделирование нестационарных электромеханических процессов в коаксиально-линейном двигателе / А.В.Жильцов, И.П.Кондратенко, А.П.Рацценкин, Д.С.Сорокин // Моделирование та інформаційні технології. – 2010. – Т2. – С.47-54.
3. Жильцов А.В. Чисельний розв'язок рівнянь динаміки коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами / А.В.Жильцов, Д.С.Сорокин // Вісник Національного технічного університету

- «ХПІ». 36. Наук. праць. Серія Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2015. – №5 (1114). – С.37-45.
- Zhiltsov A. Calculation of the magnetic field in the working area of the linear motor with permanent magnets / A.Zhiltsov, D.Sorokin // CPEE'2015 Матеріали 2015 16-ї Міжнародної конференції «Обчислювальні проблеми електротехніки» (м. Львів 2-5 вересня 2015 р.). – 2015. – С.252-255.
 - Евдокимов В.Ф. Расчет электромагнитных и тяговых характеристик коаксиально-линейного индукционного двигателя электрического вибратора методом интегральных уравнений / В.Ф. Евдокимов, А.В. Жильцов, И.П. Кондратенко [и др.] // Электронное моделирование. – 2008. – Т. 30, №4. – С. 85 – 96.
 - Квачев Г. С. Расчет переходных процессов в магнитофугальных двигателях / Г. С. Квачев, Е. И. Петрушенко // Наука и техника в городском хозяйстве. Киев: Будівельник. – 1966. – Вып. VII. – С. 3-10.
 - Петрушенко Е. И. До апроксимації інтегральних рівнянь теорії електромагнітного поля алгебраїчними системами / Е. И. Петрушенко // Доповіді АН УРСР. Сер. А. – 1969. – №7. – С. 618-621.
 - Голенков Г. М. Электромеханические характеристики коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов / Г. М. Голенков, М. Абассян // Техническая электродинамика. – 2014. – №3. – С. 64-69.
 - A. V. Zhiltsov, D. S. Sorokin Chyselnyy rozvyazok rivnyan dynamiky koaksialno-liniynogo dvyhuna z postynnymy mahnitamy [Numerical solution to the equations of dynamics coaxial linear motor with permanent magnets] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universyetu "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI". 2015, no. 5 (1114), pp. 37-45.*
 - Zhiltsov A. "Calculation of the magnetic field in the working area of the linear motor with permanent magnets" A.Zhiltsov, D.Sorokin. CPEE'2015 Materialy 2015 16 Mizhnarodnoyi konferentsiyi "Obchyslyvalyuni problemy elektrotekhniki" (m. Lviv 2-5 veresnya 2015 r.) – *Materials 2015 16th International Conference on "Computational Problems of Electrical Engineering" (Lviv 2-5 September 2015).* 2015, pp. 252-255.
 - V. F. Evdokimov, A. V. Zhiltsov, I. P. Kondratenko Raschet elektromagnitnykh i tiagovykh karakteristik koaksialno-lineinogo indukcionnogo dvigatelja elektricheskogo vibratora metodom integralnykh uravneni [Calculation and electromagnet characteristics of coaxial traction-engine ynduktsyonnoho linear electric vibrator method of integral equations] *Elektronnoe modelirovanie – Electronic modeling Kyiv.* 2008, no. 4, pp. 83-86.
 - G. S. Kvachev E. I. Petrusenko Raschet perhodnykh protsessov v magnitofugalnykh dvigateliakh [Calculation of transients in magneto-fugal engines] *Nauka i tekhnika v gorodskom hoziaistve – Science and technology in the urban economy.* Kyiv. 1966, Vol. VII, pp. 3-10.
 - Petrushenko E. I. Do aproksimatcii integralnykh rivnyan teorii elektromagnitnogo polja algebraichnymi sistemami [Prior to the approximation of the integrations of the theory of the electromagnetic field by algebraic systems] *Dopovidi AN URSR – Reports of the USSR Academy of Sciences.* Kyiv. 1969, no. 7. pp. 618-621.
 - H. M. Holenkov, M. Abassyan Elektromekhanicheskiye kharakterystyky koaksialno-lyneyynogo dvyhatelya s aksyalnym y radyalnym napravlenyyamy namahnychyvanyya postoyannykh mahnytov [Electromechanical characteristics of a coaxial-linear motor with axial and radial directions of magnetization of permanent magnets] *Tekhnichna elektrodynamika – Technical.* 2014, no. 3, pp. 64-69.

References (transliterated)

- A. Zhiltsov I. Kondratenko, D. Sorokin Mathematical modeling of nonstationary electromechanical processes in coaxial-linear engine ECONTCHMOD. Lublin-Lviv-Cracow. VOL. 12. №2. 2012. 69-73. Print.
- A. V. Zhiltsov, I. P. Kondratenko, A. P. Rashchepkin, D. S. Sorokin Matematicheskoye modelirovaniye nestatsionarnykh elektromekhanicheskikh protsessov v koaksial'no-lineynogo dvigatele [Mathematical modeling of nonstationary electromechanical processes in coaxial-linear engine] *Modelirovaniye i informatsionnyye tekhnologii – Modeling and Information Technology.* 2010, Vol 2, pp. 47-54.

Надійшла (received) 28.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз впливу вихрових струмів на динамічні та енергетичні характеристики лінійної електромеханічної системи / А. В. Жильцов, Д. С. Сорокін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 114–118. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Анализ влияния вихревых токов на динамические и энергетические характеристики линейной электромеханической системы / А. В. Жильцов, Д. С. Сорокин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 114–118. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Analysis of influence on dynamic eddy currents and power characteristics linear electromechanical systems A.V. Zhiltsov, D.S. Sorokin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 114–118. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жильцов Андрій Володимирович, д.т.н., доцент, завідувач кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання, Національний університет біоресурсів і природокористування України e-mail: azhilt@mail.ru (066) 727-06-00

Жильцов Андрей Владимирович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрических машин и эксплуатации электрооборудования, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины e-mail: azhilt@mail.ru (066) 727-06-00

Andrii Volodimirovich Zhiltsov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Head of the Department of Electrical Machinery and Electrical Equipment Operation, e-mail: azhilt@mail.ru (066) 727-06-00

Сорокін Дмитро Сергійович, старший. викладач. кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання, Національний університет біоресурсів і природокористування України, e-mail: sdima.asp@gmail.com (063)-073-41-59

Сорокин Дмитрий Сергеевич, старший. преподаватель. кафедры электрических машин и эксплуатации электрооборудования, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, e-mail: sdima.asp@gmail.com (063) -073-41-59

Dmitro Sergiyovich Sorokin, Senior Lecturer, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Department of Electrical Machinery and Electrical Equipment Operation, e-mail: sdima.asp@gmail.com (063)-073-41-59