

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВ'ЯЗАНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЛІНІЙНОМУ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОМУ ДВИГУНІ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ МУЛЬТИФІЗИЧНИХ КІЛ

О.Д. Подольцев^{1*}, докт. техн. наук, Р.П. Бондар^{2**}, канд. техн. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: podol@ied.org.ua

² Київський національний університет будівництва і архітектури,

пр. Повітрофлотський, 31, Київ, 03037, Україна,

e-mail: rpbondar@gmail.com

Розроблено комп'ютерну мультифізичну модель для розрахунку пов'язаних електричних, механічних та теплових процесів в лінійному магнітоелектричному двигуні приводу двомасової вібраційної системи. В основу моделі покладено теорію мультифізичних кіл, в межах якої для кожного із зазначених фізичних процесів складається своє еквівалентне коло, й усі вони поєднані в єдину модель, що здійснює зв'язок між цими колами. За результатами розрахунку режиму пуску двигуна та виходу на усталений тепловий режим показано, що перехідний тепловий процес двигуна триває понад 2 години роботи, і при цьому найбільш нагрітий його елемент – обмотка – нагрівається до температури більше 130 °С. Застосування розробленої мультифізичної моделі дозволяє прогнозувати електромеханічні та теплові характеристики двигуна при використанні різних систем охолодження – природне, штучне охолодження за допомогою повітря або рідини як у перехідних, так і усталених режимах роботи. Бібл. 8, рис. 7.

Ключові слова: двомасова вібраційна система, електромеханічні та теплові процеси, лінійний магнітоелектричний двигун, механічне коло, теплове коло.

Вступ. Вібраційні технології є основою багатьох сучасних будівельних технологічних процесів, пов'язаних з переміщенням та обробкою матеріалів, ущільненням, сортуванням, гранулюванням тощо [1]. Застосування лінійних магнітоелектричних двигунів (ЛМД) вібраційної дії [2] в приводах будівельних машин забезпечує низку переваг, основними з яких є широкий частотний робочий діапазон, відсутність механічних передач, що перетворюють обертовий рух у лінійний, а отже, надійність і низький рівень шуму, а також можливість регулювання експлуатаційних характеристик в автоматичному режимі.

Наявність нелінійних властивостей вібраційної системи з приводом від ЛМД робить її більш складною для аналізу та забезпечення необхідних технологічних показників. В залежності від значень параметрів машини та характеру навантаження можуть змінюватися режими коливань, порушуватися їхня стабільність, виникати небажані або неефективні режими роботи.

Раніше було показано, що у двомасовій вібраційній системі з приводом від ЛМД залежно від характеру руху його якоря та робочого органу можлива реалізація різних динамічних режимів: періодичного, квазіперіодичного та хаотичного [3, 4]. У випадку роботи в неперіодичних режимах розрахунок теплових показників машини має виконуватись одночасно з розрахунком електромеханічних процесів, що обумовлено нерегулярним характером останніх. Тому актуальним є питання розробки математичних моделей для дослідження теплових процесів ЛМД в залежності від динамічного режиму роботи вібраційної системи. Це дасть змогу забезпечити необхідні технологічні показники з урахуванням допустимого рівня температури лінійного двигуна. Для вирішення цієї задачі в роботі пропонується використовувати схеми заміщення на основі еквівалентних кіл із зосередженими параметрами, що моделюють одночасно електричні, механічні та теплові процеси. Такий підхід реалізується в рамках теорії мультифізичних кіл, що запропонована в роботі [5].

Метою роботи є розробка комп'ютерної моделі для розрахунку пов'язаних електромеханічних та теплових процесів в лінійному магнітоелектричному двигуні приводу двомасової вібраційної системи, що ґрунтується на теорії мультифізичних кіл, а також розрахунок, згідно розробленої моделі, електромеханічних та теплових характеристик ЛМД в перехідних та усталених режимах роботи.

Модель вібраційної системи з приводом від ЛМД. У вібраційних машинах, що застосовуються в будівельному виробництві під час, наприклад, ущільнення бетону або формування бетонних виробів, як віброзбудник може використовуватись ЛМД вібраційної дії, схематично разом із платфо-

рмою показаний на рис. 1. Двигун має статор 1, що містить шихтований магнітопровід і обмотку та яркір 2 з масивним магнітопроводом із конструкційної сталі та постійним магнітом аксіального напрямку намагнічування. Статор двигуна за допомогою конструктивного елемента 3 жорстко кріпиться до технологічної платформи 4, на якій розташована бетонна суміш. Платформа має масу m_p й закріплена на нерухомій основі за допомогою пружно-в'язких елементів, які характеризуються коефіцієнтами жорсткості k_p та в'язкого тертя b_p . Яркір двигуна 2 механічно пов'язаний зі статором за допомогою інших пружно-в'язких елементів з параметрами відповідно k_v та b_v . Вібруюча платформа разом із двигуном утворюють двомасову механічну систему, коливальний рух якої здійснюється завдяки періодичній дії електромагнітної сили F_{ev} , що діє на статор та на яркір двигуна.

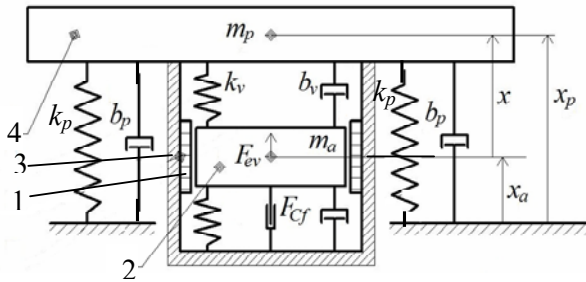


Рис. 1

на рис. 2. Модель має кероване джерело синусоїдної напруги живлення, та складається з п'яти функціональних блоків – електричного 1, механічного 2, теплового (перехідний режим) 3, теплового (усталений режим) 4 та блока 5 для вимірювання та візуалізації результатів розрахунку. Зв'язок між блоками реалізується програмними засобами пакету Simulink.

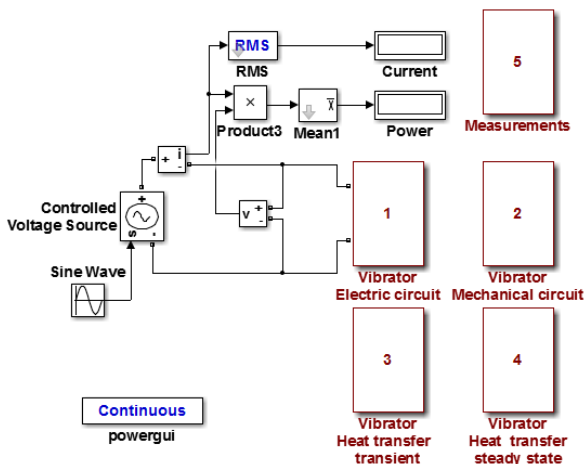


Рис. 2

теми лінійного двигуна; x – координата яркіра (миттєве значення).

Структура механічного блоку 2 даної системи (рис. 3, б) реалізує двомасову механічну схему за допомогою еквівалентного електричного кола. Вузлові напруги кола дорівнюють швидкості руху платформи із бетонною сумішшю (вузол 1) та швидкості яркіра двигуна (вузол 2). На ці елементи системи діють сили інерції (ємнісні елементи в колі) і пружні та дисипативні сили – відповідно індуктивні та резистивні елементи кола. Джерело струму в цьому колі відповідає електромагнітній силі, що діє на яркір ЛМД, а також за третім законом Ньютона на його статор, жорстко закріпленій на платформі. Ця сила розраховувалась згідно наступного виразу: $F_{ev} = i_v d\Psi_{pm} / dx = (\Psi_{pm} \pi / \tau) \cos(\pi x / \tau) i_v$.

Колу, що показано на рис. 3, б, відповідає наступна система рівнянь механічного перехідного процесу:

$$\left. \begin{aligned} m_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} &= F_{ev} - k_v x - b_v \frac{dx}{dt}; \\ m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} &= -F_{ev} + k_v x + b_v \frac{dx}{dt} - k_p x_p - b_p \frac{dx_p}{dt}, \end{aligned} \right\}$$

В моделі приймаються наступні припущення: значення індуктивності обмотки ЛМД стали й не залежить від положення яркіра; коливальні маси являють собою абсолютно жорсткі тіла; поведінка пружних елементів описується законом Гука, тобто їхня жорсткість є постійною величиною; маса m_p враховує також приєднану масу навантаження (масу бетонної суміші тощо).

Мультифізичну модель вібраційної системи з приводом від ЛМД, створену за допомогою пакету програм Matlab/Simulink, наведено

Структура електричного блоку 1 системи (рис. 3, а) реалізує рівняння балансу напруг ЛМД

$$u_v = i_v R_{sv} + \frac{d\Psi_s}{dt},$$

де u_v – напруга живлення двигуна; R_{sv} – активний опір обмотки статора; i_v – струм ЛМД; $\Psi_s = L_v i_v + \Psi_{pm}$ – повне потокозчеплення обмотки; L_v – індуктивність обмотки статора; $\Psi_{pm} = \Psi_m \sin(\pi x / \tau)$ – потокозчеплення обмотки, зумовлене полем постійних магнітів; Ψ_m – амплітуда потокозчеплення; τ – полюсна поділка магнітної системи

де m_a – маса якоря двигуна; x – переміщення якоря відносно статора (рис. 1); x_a – переміщення якоря відносно нерухомої системи координат ($x_a = x + x_p$); x_p – переміщення платформи.

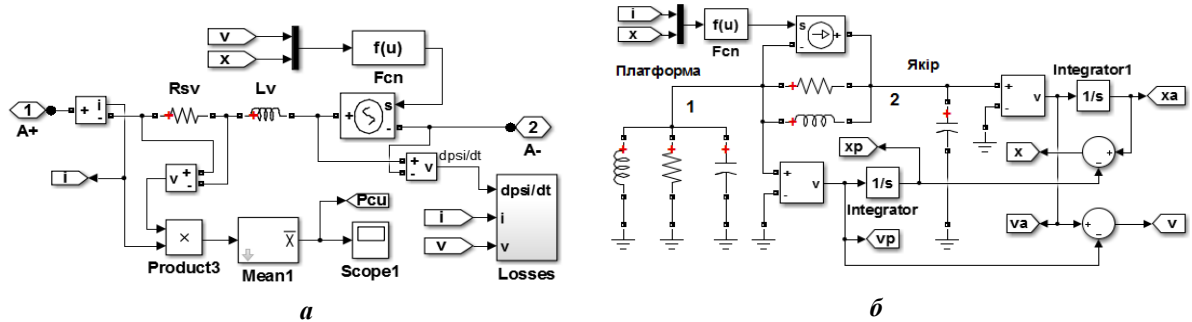


Рис. 3

Теплові процеси в ЛМД задовольняють рівнянню теплопередачі у вигляді

$$\rho C_p \partial T / \partial t + \nabla(-\lambda \nabla T) = Q,$$

де всі позначення є загальновідомими. Для переходу до дискретного аналогу цього рівняння використовувався метод контрольного об'єму [6]. При цьому, обираючи як контрольний об'єм активні елементи двигуна – обмотку, магнітопровід статора та якоря, зовнішній корпус – можна отримати систему звичайних диференціальних рівнянь, записаних відносно невідомих значень температури в центральних точках цих елементів. Цій системі відповідає еквівалентне теплове коло, яке показано на рис. 4 (блок 3 на рис. 2). Вузлові напруги в цьому колі є аналогом температур відповідних елементів – магнітопроводу якоря, обмотки статора, магнітопроводу статора, зовнішнього корпусу, а струми у вітках кола є аналогом теплових потоків між цими елементами. Розрахунок значень пасивних елементів у цій схемі здійснювався за допомогою відомих виразів, наведених, зокрема, в [7].

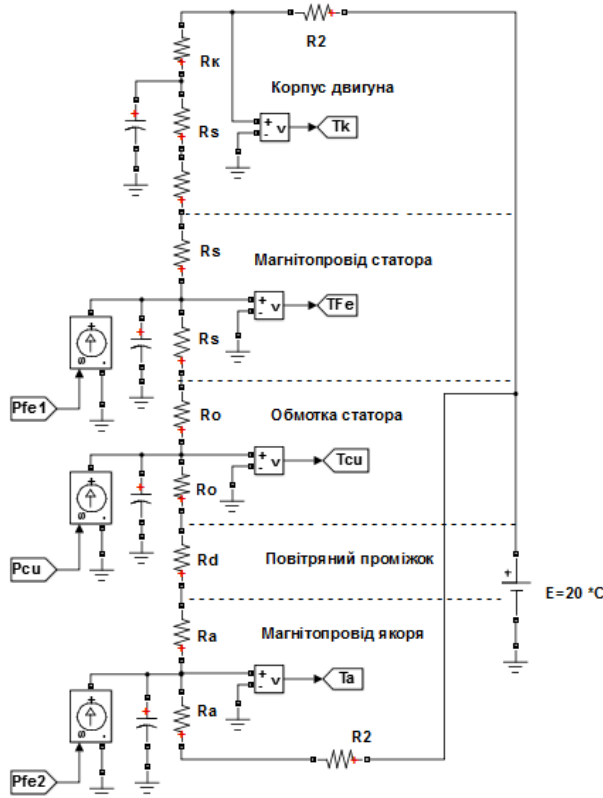


Рис. 4

Як джерело живлення в цьому колі використовуються джерела струмів, значення яких дорівнюють значенням миттєвих втрат в активних елементах ЛМД. А саме, джоулеві втрати в обмотці двигуна $P_{Cu} = i_v^2 R_{sv}$, магнітні втрати в магнітопроводі статора $P_{Fe,s}$ та магнітні втрати в магнітопроводі якоря $P_{Fe,a}$.

Для обчислення втрат в шихтованому магнітопроводі статора ЛМД в моделі використовувалися наступні вирази [8], що дозволяють визначити складові питомих втрат в магнітопроводі (на одиницю маси) із магнітною індукцією $B(t)$:

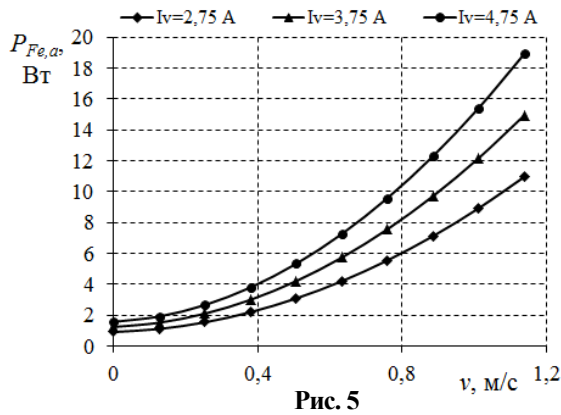
$$\text{втрати на вихрові струми} - P'_{eddy} = \frac{k_{eddy}}{2\pi^2} \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt; \text{ додаткові втрати} - P'_{exc} = \frac{k_{exc}}{8,76 T} \int_{t-T}^t \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1,5} dt;$$

втрати на гістерезис – $P'_{hys} = k_{hys} \frac{1}{T} B_m^\alpha$, де B_m – амплітудне значення магнітної індукції; k_{eddy} , k_{exc} , k_{hys} , α – коефіцієнти втрат, що залежать від марки сталі. Повні втрати в магнітопроводі статора із масою m визначаються як $P_{Fe,s} = (P'_{eddy} + P'_{exc} + P'_{hys}) m$.

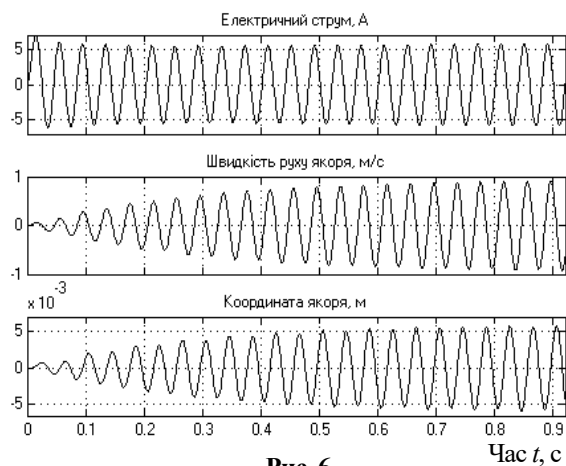
В даній роботі використовувалися наступні значення коефіцієнтів, що відповідають матеріалу

електротехнічної сталі 3411: $k_{eddy} = 1,96 \cdot 10^{-4}$, $k_{exc} = 6,97 \cdot 10^{-4}$, $k_{hys} = 2,148 \cdot 10^{-3}$, $\alpha = 3$, отримані за результатами власних досліджень.

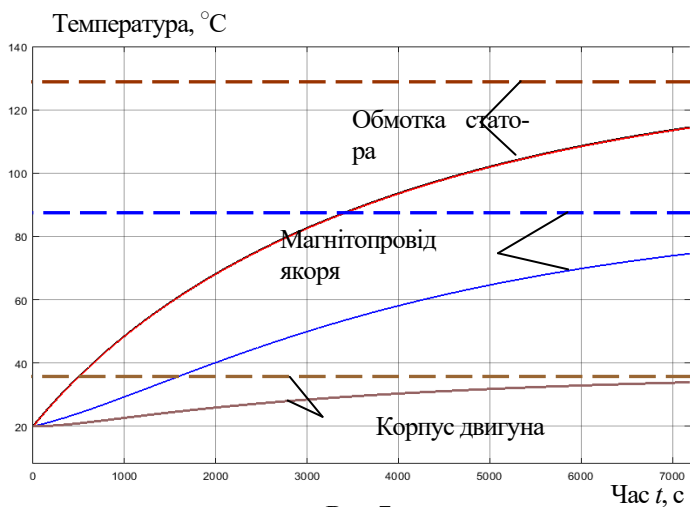
Втрати в масивному магнітопроводі якоря визначаються на підставі розрахункових залежностей $P_{Fe,a}(v, I_v)$ для даного двигуна (рис. 5), що були отримані за результатами чисельного розрахунку магнітного поля. Тут v – миттєве значення швидкості якоря, а I_v – діюче значення струму ЛМД.



тивний опір обмотки статора $R_{sv} = 2,67$ Ом; індуктивність обмотки статора $L_v = 22$ мГн; маса якоря двигуна $m_a = 9,8$ кг; коефіцієнт в'язкого тертя $b_v = 32$ кг/с; коефіцієнт жорсткості пружної підвіски двигуна $k_v = 153291$ Н/м; маса платформи $m_p = 31,2$ кг; коефіцієнт в'язкого тертя $b_p = 35$ кг/с; коефіцієнт жорсткості амортизаторів платформи $k_p = 306582$ Н/м; частота гармонічного джерела живлення $f = 25$ Гц. Температура навколишнього середовища – 20 °С.



кож на цьому рисунку пунктирними кривими показано значення цих же температур в усталеному режимі – результати розрахунку теплового кола блока 3.



вібраційної системи.

Блок 4 на рис. 2 містить теплове коло, що відповідає усталеному тепловому режиму роботи двигуна. Це коло відрізняється від показаного на рис. 4 відсутністю смісних елементів.

Блок 5 призначений для вимірювання та візуалізації результатів розрахунків електромеханічних та теплових процесів в перехідному та усталеному режимах.

Результати комп'ютерних розрахунків вібраційної системи з приводом від ЛМД. Під час розрахунків приймалися наступні значення параметрів системи: амплітуда поточкозчеплення $\Psi_m = 0,31$ Вб; активний опір обмотки статора $R_{sv} = 2,67$ Ом; індуктивність обмотки статора $L_v = 22$ мГн; маса якоря двигуна $m_a = 9,8$ кг; коефіцієнт в'язкого тертя $b_v = 32$ кг/с; коефіцієнт жорсткості пружної підвіски двигуна $k_v = 153291$ Н/м; маса платформи $m_p = 31,2$ кг; коефіцієнт в'язкого тертя $b_p = 35$ кг/с; коефіцієнт жорсткості амортизаторів платформи $k_p = 306582$ Н/м; частота гармонічного джерела живлення $f = 25$ Гц. Температура навколишнього середовища – 20 °С.

Результати розрахунку електромеханічного перехідного процесу двигуна в пусковому режимі наведено на рис. 6. Із рисунка видно, що електричний перехідний процес триває в межах 1-2 періодів змінення напруги джерела живлення, а механічний перехідний процес продовжується приблизно 12 періодів. При виході на усталений режим роботи амплітуда коливань якоря становить $0,006$ м.

Результати розрахунку довготривалого перехідного теплового процесу (впродовж 2-х годин) наведено на рис. 7, де суцільними кривими показано залежності температур корпусу двигуна, магнітопроводу якоря та обмотки статора від часу – результати розрахунку за допомогою теплового кола блока 3.

Також на цьому рисунку пунктирними кривими показано значення цих же температур в усталеному режимі – результати розрахунку теплового кола блока 4. Із наведених даних можна зробити висновок, що для виходу на усталений тепловий режим двигуна при зазначених вище параметрах вібраційної системи необхідно понад 2 години роботи і при цьому найбільш нагрітий елемент ЛМД – обмотка – буде мати температуру 132 °С.

Застосування розробленої мультифізичної моделі дає змогу прогнозувати електромеханічні та теплові характеристики двигуна у перехідних та усталених режимах роботи. Зазначимо, що перевагою запропонованого підходу є можливість визначення теплових показників ЛМД у форсованих або неперіодичних динамічних режимах роботи

Висновки. Запропоновано комп'ютерну модель для розрахунку пов'язаних електричних, механічних та теплових процесів в перехідних та усталених режимах роботи лінійного магнітоелектричного двигуна вібраційної дії, розроблену на основі теорії мультифізичних кіл. При цьому за даними електромеханічного процесу розраховуються миттєві значення втрат електричної енергії в обмотці статора та магнітопроводах статора і якоря, які враховуються в тепловому колі відповідними джерелами тепла.

За результатами розрахунку режиму пуску та виходу на усталений тепловий режим показано, що тепловий перехідний процес триває понад 2 години, і при цьому найбільш нагрітий елемент двигуна – обмотка – буде мати температуру 132 °С.

Використання розробленої мультифізичної моделі ЛМД приводу двомасової вібраційної системи дає змогу прогнозувати електромеханічні та теплові показники лінійного двигуна із різними системами охолодження – природного, штучного охолодження за допомогою повітря або рідини як у перехідних, так і усталених режимах роботи.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі» (шифр «ЕЛКАБ»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 04.07.2017 р., протокол №11. Державний реєстраційний номер роботи 0117U007713.

1. Гончаревич И.Ф. Вибротехника в горном производстве. М.: Недра, 1992. 320 с.
2. Бондар Р.П. Дослідження характеристик магнітоелектричного лінійного вібраційного двигуна при роботі на пружно-в'язке навантаження. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 1. С. 9-16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.1.02>
3. Бондар Р.П., Подольцев О.Д. Режимы работы линейного магнитоэлектричного двигателя как элемента виброударной системы. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2019. Вип. 54. С. 52-62. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.052>
4. Chau K.T, Wang Z. Chaos in Electric Drive Systems: Analysis, Control and Application. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011. 318 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470826355>
5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
6. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Pub. Corp., 1980. 197 p.
7. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989. 240 с.
8. Hargreaves P.A., Mecrow B.C., Hall R. Calculation of iron loss in electrical generators using finite-element analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012. Vol. 48. No 5. Pp. 1460-1466. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2209851>

УДК 621.313.323

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОМ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ДВИГАТЕЛЕ НА ОСНОВАНИИ ТЕОРИИ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

А.Д. Подольцев¹, докт. техн. наук, Р.П. Бондар², канд. техн. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: podol@ied.org.ua

² Київський національний університет будівництва і архітектури,

пр. Воздухофлотський, 31, Київ, 03037, Україна,

e-mail: rpbondar@gmail.com

Разработана компьютерная мультифизическая модель для расчета связанных электрических, механических и тепловых процессов в линейном магнитоэлектрическом двигателе привода двухмассовой вибрационной системы. В основу модели положена теория мультифизических цепей, в рамках которой для каждого из указанных физических процессов строится своя эквивалентная цепь, и все они объединены в единую модель, осуществляющую связь между этими цепями. По результатам расчета режима пуска двигателя и выхода на устойчивый тепловой режим показано, что переходный тепловой процесс двигателя длится более 2-х часов работы, и при этом наиболее нагретый его элемент – обмотка – нагревается до температуры более 130 °С. Применение

разработанной мультифизической модели позволяет прогнозировать электромеханические и тепловые характеристики двигателя при использовании различных систем охлаждения – естественное, искусственное охлаждение с помощью воздуха или жидкости как в переходных, так и установившихся режимах работы. Библ. 8, рис. 7.

Ключевые слова: двухмассовая вибрационная система, электромеханические и тепловые процессы, линейный магнитоэлектрический двигатель, механическая цепь, тепловая цепь.

MODELING OF COUPLED ELECTROMECHANICAL AND THERMAL PROCESSES IN A LINEAR PERMANENT MAGNET MOTOR BASED ON THE MULTIPHYSICS CIRCUIT THEORY

O.D. Podoltsev¹, R.P. Bondar²

¹ Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: podol@ied.org.ua

² Kyiv National University of Construction and Architecture,

Povitroflotsky Ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine,

e-mail: rpbondar@gmail.com

The paper presents a computer multiphysics model that has been developed for calculating the related electrical, mechanical, and thermal processes in a linear permanent magnet motor for two-mass vibration system. The model is based on the theory of multiphysics circuits, in the framework of which for each of the indicated physical processes its own equivalent circuit is built, and all of them are combined into a single model that carries out the connection between all these circuits. According to the results of calculating the motor starting mode and reaching a stable thermal mode, it is shown that the transient thermal process for the motor lasts more than 2 hours of operation, and at the same time its most heated element – the winding, is heated to a temperature of more than 130 °C. The application of the developed multiphysics model allows one to predict the electromechanical and thermal characteristics of the motor when using various cooling systems – natural cooling, forced cooling using air or liquid, both in transient and steady-state operation modes. References 8, figures 7.

Keywords: electromechanical and thermal processes, linear permanent magnet motor, mechanical circuit, thermal circuit, two-mass vibration system.

1. Goncharevich I.F. Vibrotechnics in mining. Moskwa: Nedra, 1992. 320 p. (Rus)
2. Bondar R.P. Research of the magnetoelectric linear oscillatory motor characteristics during the work on elastoviscous loading. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. No 1. Pp. 9-16. (Ukr)
DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.1.02>
3. Bondar R.P., Podoltsev A.D. Operating modes of a linear permanent magnet motor as an element of vibration system. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2019. No 54. Pp. 52-62. (Ukr)
DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.052>
4. Chau K.T, Wang Z. Chaos in Electric Drive Systems: Analysis, Control and Application. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011. 318 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470826355>
5. Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of electrodynamics National academy of sciences of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus)
6. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Pub. Corp., 1980. 197 p.
7. Sipaylov G.A, Sannikov D.I, Zhadan V.A. Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machines. Moskwa: Vysshaya shkola, 1989. 240 p. (Rus)
8. Hargreaves P.A., Mecrow B.C., Hall R. Calculation of iron loss in electrical generators using finite-element analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012. Vol. 48. No 5. Pp. 1460-1466.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2209851>

Надійшла 06.12.2019
Остаточний варіант 22.01.2020