ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

УДК 621.313.323

doi: 10.20998/2079-3944.2025.1.06

Р.П. БОНДАР, Г.М. ГОЛЕНКОВ, О.С. БОНДАР

СИСТЕМА ФАЗОВОГО КЕРУВАННЯ ВІБРАЦІЙНОЇ ПЛОЩАДКИ З ПРИВОДОМ ВІД ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Сучасна промисловість вимагає високоточного керування вібраційними електромеханічними системами. Для досягнення оптимального режиму роботи вібраційних машин важливе значення має розроблення систем керування, що дають змогу забезпечити баланс між енергоефективністю та продуктивністю в різних динамічних режимах. У представленій роботі розроблено систему фазового керування вібраційної площадки з приводом від лінійного двигуна з постійними магнітами. Об'єкт керування представлений двомасовою механічною схемою, що враховує пружні властивості вібраційної підвіски та сили сухого і в'язкого тертя. У ролі збудника періодичної електромагнітної сили розглядається вібраційний лінійний двигун із беззубцевою структурою статора. Електрична модель двигуна подана схемою заміщення із зосередженими параметрами, значення яких є функціями переміщення бігуна відносно статора. За допомогою розробленої Simulink-моделі проведено дослідження резонансних властивостей електромеханічної системи, та визначено режими, що відповідають максимальним значенням механічної потримото али систем, та визначено режими, що відповідають максимальним значенням механічної системи, та визначено режими, що відповідають максимальним значенням магнітами. Система керування порівноє фазу вхідного сигналу з фазового керуми з приводом від лінійного двигуна з постійними магнітами. Система керування порівноє фазу вхідного сигему разового керування вібраційної площадки з приводом від лінійного двигуна з постійними магнітами. Система керування порівноє фазу вхідного сигналу з фазового керуму двигуна, приводом від лінійного регулюється для досягнення синхронізації. Водночає струм двигуна підтримується статалим. Проведено моделювання такої системи в програмному пакеті Мatlab/Simulink та досліжено її перехідні процеси під чає зміни маси матеріалу віброплощадки.

Ключові слова: вібраційна площадка, двомасова механічна система, електромеханічна система, лінійний двигун із постійними магнітами, резонансні властивості, система фазового керування.

R.P. BONDAR, H.M. HOLENKOV, O.S. BONDAR

PHASE CONTROL SYSTEM OF A VIBRATING PLATFORM DRIVEN BY A PERMANENT MAGNET LINEAR MOTOR

Modern industry requires high-precision control of vibrating electromechanical systems. To achieve the optimal operating mode of vibrating machines, it is important to develop control systems that allow for a balance between energy efficiency and productivity in different dynamic modes. In the presented work, a phase control system for a vibrating platform driven by a permanent magnet linear motor has been developed. The control object is represented by a two-mass mechanical scheme that takes into account the elastic properties of the vibration suspension and the forces of Coulomb and viscous friction. A vibrating linear motor with a toothless stator structure is considered as the exciter of the periodic electromagnetic force. The electrical model of the motor is presented by an equivalent circuit with lumped parameters, the values of which are functions of the mover movement relative to the stator. Using the developed Simulink model, a study of the resonant properties of the electromechanical system for a vibration platform driven by the linear motor with permanent magnets has been developed. The control system of mechanical power and efficiency were determined. A phase control system for a vibration platform driven by the linear motor with permanent magnets has been developed. The control system compares the phase of the input signal with the phase of the motor system for a vibration platform driven by the linear motor with permanent magnets has been developed. The control system compares the phase of the input signal with the phase of the motor system for a vibration platform driven by a system has been simulated in the Matlab/Simulink software package and its transient processes have been investigated during changes in the mass of the vibrating platform material.

Keywords: electromechanical system, permanent magnet linear motor, phase control system, resonant properties, two-mass mechanical system, vibration platform.

Вступ. Сучасна промисловість вимагає високоточного керування вібраційними електромеханічними системами, які широко використовуються в багатьох галузях [1-5]. Для досягнення оптимального режиму роботи вібраційних машин важливе значення має розроблення систем керування, що дають можливість забезпечити баланс між енергоефективністю та продуктивністю в різних динамічних режимах. Крім підтримання необхідних технологічних показників (амплітуди та прискорення вібрації), привід повинен мати невелику інерційність, щоб забезпечувати потрібні динамічні характеристики та високу керованість. Це зумовлює підвищення вимог до вібраційних приводів та стимулює пошук нових конструктивних рішень.

Вібраційні машини зазвичай працюють у режимах вище або нижче резонансу [6], проте найбільшої ефективності можна досягти в режимах наближених до резонансу [7, 8]. Оскільки параметри вібраційної машини (зокрема навантаження) можуть змінюватися під час експлуатації, для налаштування потрібного режиму роботи необхідно використовувати систему керування, щоб підтримувати резонансний режим постійно. У деяких процесах, як от вібраційна обробка, важливим є також забезпечення технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля [9]. Причому в процесі роботи адаптивної вібраційної технологічної машини система керування контролює два параметри частоту та амплітуду коливань робочого органу і, у випадку зміни маси завантаження робочого органу, коригує частоту та амплітуду коливань вібропривода.

Використання лінійних приводів у вібраційних машинах забезпечує підтримання енергоефективного білярезонансного режиму роботи [8, 10-12]. Для цього система керування має підтримувати заданий фазовий кут між електромагнітною силою та переміщенням робочого органу. Оптимальне значення кута варіюється залежно від типу приводу, механічної схеми та її параметрів від 45° до 90° [8, 10, 13]. Цей кут може бути визначений заздалегідь на підставі попереднього аналізу вібраційної системи та її електромеханічних характеристик, і потім використовуватись як референтне значення для системи керування.

Іншим рішенням є реалізація пошукового алгоритму резонансної частоти [14]. Однак цей спосіб має два суттєвих недоліки: перший – пошуковий процес триває

© Р.П. Бондар, Г.М. Голенков, О.С. Бондар, 2025

досить тривалий проміжок часу, що за умови змінного навантаження робить таку систему неефективною. Другий недолік у тому, що результатом пошуку є частота максимальної амплітуди коливань, що здебільшого не є оптимальним режимом із погляду ефективності та виконуваної роботи [7].

У цьому дослідженні в ролі вібраційного збудника площадки розглядається лінійний двигун із постійними магнітами (ЛДПМ) [7, 15]. Такі двигуни мають низку характеристик, що роблять їх перспективним рішенням для застосування в приводах вібраційних мапин. Через особливості конструкції немає необхідності використання механічних передач, оскільки електрична енергія перетворюється безпосередньо у зворотно-поступальний рух. Це зменшує втрати, покращує динамічні характеристики, а застосування сучасних потужних постійних магнітів забезпечує компактність, високу продуктивність та енергоефективність.

Метою дослідження є пошук ефективних режимів роботи вібраційної площадки з приводом від ЛДПМ та їх реалізація в умовах змінного навантаження за допомогою системи автоматичного керування.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання:

розроблення математичної моделі вібраційної системи з приводом від ЛДПМ;

розроблення системи керування з достатньо високою швидкодією налаштування на заданий режим;

розроблення імітаційної моделі системи та перевірка ефективності системи керування за допомогою моделювання.

Модель об'єкта керування. Вібраційні площадки використовуються для створення контрольованих механічних коливань. Принцип їхньої роботи базується на перетворенні енергії збудника (електричного, механічного або гідравлічного) у коливальні рухи, які передаються робочій платформі або іншому об'єкту.

Конструкція площадки для формування бетонних виробів із приводом від ЛДПМ вібраційної дії наведена на рис. 1. Тут лінійний двигун 1 жорстко кріпиться до платформи 2, що ізолюється від фундаменту 3 за допомогою опорних амортизаторів 4.



Рис. 1. Будова площадки для формування бетонних виробів

Механічна схема вібраційної площадки за рис. 1 найчастіше розглядається як двомасова, з двома ступенями вільності. Динамічна поведінка таких систем за синусоїдного збудження порівняно добре відома. Математичну модель лінійного вібраційного двигуна, а також основні підходи для отримання його характеристик та параметрів представлено в роботах [7, 15, 16]. Механічна модель віброплощадки. Механічна схема віброплощадки показана рис. 2. Тут двигун 1 жорстко кріпиться до рами з платформою 2, що має масу m_p . Бігун 3 двигуна з'єднується зі статором через пружні елементи 4. Платформа ізолюється від фундаменту опорними амортизаторами з коефіцієнтом жорсткості k_p . Система здійснює переміщення під дією періодичної електромагнітної сили F_e , частота та амплітуда якої задається системою керування.



Рис. 2. Механічна схема віброплощадки

У ролі вихідних припущень приймаються такі: коливальні маси являють собою абсолютно жорсткі тіла;

жорсткість пружних елементів ε постійною величиною;

маса m_p враховує також приєднану масу навантаження (масу бетонної суміші тощо);

у початковому стані система перебуває в положенні механічної рівноваги, коли є статична рівновага між силою тяжіння та силами пружності.

Якщо прийняти за початок координати переміщення положення механічної рівноваги системи (положення мас, коли немає сили F_e), то наведеній механічній схемі відповідають такі рівняння руху:

$$m_{v}\frac{d^{2}x_{v}}{dt^{2}}+k_{v}x+b_{v}\frac{dx}{dt}+F_{Cf}\operatorname{sign}\frac{dx}{dt}=F_{e};$$

$$p_{v}\frac{d^{2}x_{p}}{dt^{2}}-k_{v}x-b_{v}\frac{dx}{dt}-F_{Cf}\operatorname{sign}\frac{dx}{dt}-F_{e}+k_{p}x+b_{p}\frac{dx_{p}}{dt}=0,$$
(1)

 $m_p dt^2 - k_v x - b_v dt^{-1} Cf^{sign} dt^{-1} e^{-k_p x} + b_p dt^{-0}$,) де m_v – маса бігуна ЛДПМ; x_v – абсолютне переміщення бігуна відносно нерухомої системи координат; k_v – коефіцієнт жорсткості пружин вібратора; $x = x_v - x_p$ – переміщення бігуна відносно статора; b_v – коефіцієнт в'язкого тертя вібратора; F_{Cf} – сила сухого тертя; F_e – електромагнітна сила; m_p – маса віброплощадки з бетонною сумішшю та вібратором; x_p – переміщення віброплощадки; k_p – коефіцієнт жорсткості пружин віброплощадки; b_p – коефіцієнт в'язкого тертя віброплощадки.

Електрична модель двигуна. У ролі збудника періодичної електромагнітної сили F_e розглядається вібраційний ЛДПМ із беззубцевою структурою статора.

Схема заміщення двигуна представлена на рис. 3, де R_s , L_s – відповідно активний опір та індуктивність обмотки статора, e – ЕРС, індукована в обмотці статора внаслідок руху бігуна.

У наведеній розрахунковій схемі заміщення опір обмотки статора R_s приймається сталим. Індуктивність обмотки $L_s \in ф$ ункцією переміщення бігуна відносно статора. ЕРС статора дорівнює $e = -\frac{d\Psi_{pm}}{dt}$, де Ψ_{pm} –

потокозчеплення обмотки статора, зумовлене полем постійних магнітів, яке є функцією положення бігуна.



Рис. 3. Електрична схема заміщення

Враховуючи зазначене, і відповідно до схеми заміщення, диференціальне рівняння рівноваги напруг обмотки статора машини може бути записане у вигляді:

$$u_{s} = i_{s}R_{s} + \frac{d}{dt} \left(\Psi_{pm} + L_{s}i_{s} \right) =$$

= $i_{s}R_{s} + \frac{d\Psi_{pm}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{dL_{s}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}i_{s} + L_{s}\frac{di_{s}}{dt},$ (2)

де u_s , i_s – відповідно напруга та струм обмотки двигуна; x – переміщення бігуна відносно статора.

Електромагнітну силу двигуна можна виразити через похідну магнітної енергії W_m за переміщенням бігуна:

$$F_e = \frac{\partial W_m}{\partial x} \Big|_{i_s = \text{const}} = \frac{d\Psi_{pm}}{dx} i_s + \frac{1}{2} \frac{dL_s}{dx} i_s^2.$$
(3)

Для беззубцевого типу ЛДПМ залежності індуктивності та потокозчеплення від переміщення *x* досить добре апроксимуються синусоїдними функціями:

$$\Psi_{pm} = \Psi_m \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x\right); \tag{4}$$

$$L_s = L_{av} + L_{sm} \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}x\right),\tag{5}$$

де Ψ_m – амплітудне значення потокозчеплення; τ – полюсна поділка; L_{av} , L_{sm} – відповідно середнє та амплітудне значення індуктивності обмотки статора.

З останніх виразів:

$$\frac{d\Psi_{pm}}{dx} = \frac{\Psi_m \pi}{\tau} \cos\left(\frac{\pi}{\tau}x\right); \tag{6}$$

$$\frac{dL_s}{dx} = -\frac{2L_{sm}\pi}{\tau}\sin\left(\frac{2\pi}{\tau}x\right).$$
 (7)

Simulink-модель вібраційної системи «лінійний двигун-віброплощадка». Для дослідження механічних властивостей системи «лінійний двигун-віброплощадка» було розроблено її модель у середовищі Matlab/Simulink, що показана на рис. 4.

Тут блок Vibrator реалізує віртуальну модель лінійного двигуна вібраційної дії. Розгорнута структура блоку представлена на рис. 5. Модель побудована на основі керованого джерела струму (блок Controlled Current Sources).

Блок Flux Linkage calculation здійснює обчислення потокозчеплення Ψ_{pm} та індуктивності L_s згідно з виразами (4, 5).

Блок Mechanic equation вирішує систему рівнянь механічного руху (1). Розгорнута структура блоку подана на рис. 6.

Розрахунок моделі проводився з вихідними параметрами, наведеними в табл. 1.



Рис. 4. Simulink-модель системи «лінійний двигун-віброплощадка»

Блок Fe calculation (рис. 5) виконує обчислення електромагнітної сили F_e за виразом (3). Вхідними сигналами блоку є положення бігуна x, а також струм i_s в обмотці статора двигуна.



Рис. 5. Simulink-модель вібраційної системи



Рис. 6. Механічні рівняння системи

Живлення двигуна здійснюється від керованого джерела синусоїдного струму з фіксованим діючим значенням 10 А, кутова частота якого з часом повільно зростає від 1 Гц до 50 Гц. Резонансні характеристики системи, розраховані за допомогою представленої моделі, наведені на рис. 7, звідки видно, що для заданих значень параметрів є дві резонансні частоти, коли амплітуди переміщення бігуна і площадки є максимальними.

2,67
2,35
0,071
0,07
0,0035
77
1350
0,687e+6
15
200
7500
1.07.16

TT (1	п		• •	
Таолиця І	— Парамет	ри елект	ромеханичной	системи

За прийнятої розрахункової моделі, корисна потужність, що віддається в навантаження, витрачається на покриття втрат на еквівалентне в'язке тертя віброплощадки із сумішшю і дорівнює

$$P_l = \frac{b_p}{T} \int_{t-T}^t v_p^2 dt \,, \tag{8}$$

де *v*_p – швидкість руху платформи.



переміщення бігуна та платформи

ККД двигуна η та всієї системи «лінійний двигунвіброплощадка» Ση розраховувалися за виразами:

$$\eta = P_{mec} / \left(T^{-1} \int_{t-T}^{t} u_s i_s dt \right); \quad \sum \eta = P_l / \left(T^{-1} \int_{t-T}^{t} u_s i_s dt \right). \quad (9)$$

Залежності ККД та механічних потужностей, розраховані за допомогою (9), показані на рис. 8.



Механічна потужність двигуна P_{mec} визначається з миттєвих значень електромагнітної сили F_e та відносної швидкості бігуна v за виразом

$$P_{mec} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^{t} F_e v dt \, .$$

Механічна потужність платформи визначається згідно з (8). На рис. 8 також позначено точки максимальної механічної потужності двигуна та платформи 1–4.

Показники електромеханічної системи, що відповідають точкам максимальної механічної потужності, наведені в табл. 2. Тут значення фазових кутів відраховується по відношенню до струму, початкова фаза якого приймається рівною нулю.

	1	2	3	4		
Амплітуда напруги Usm, В	159	113,1	157,2	117		
Фаза напруги ψυ, град	-56,41	-51,38	-55,74	-51,92		
Амплітуда переміщення платформи <i>Х_{рт}</i> , м	0,00178	0,00276	0,00174	0,00277		
Фаза переміщення плат- форми <i>ухр</i> , град	-109,4	131,42	-102,97	118,32		
Амплітуда переміщення бігуна <i>X_m</i> , м	0,00382	0,00428	0,00382	0,00479		
Фаза переміщення бігуна <i>үх</i> , град	91,5	76,4	97,11	68,6		
Частота f, Гц	20,21	12,18	20,6	11,88		

Таблиця 2 – Точки максимальної механічної потужності

Як випливає з отриманих даних, максимуми механічної потужності не збігаються з максимальними амплітудами коливань бігуна та платформи. Водночас максимальні значення ККД (див. рис. 8) відповідають точкам максимальної механічної потужності, що свідчить про можливість застосування цих режимів як референтних для системи керування.

Система фазового керування робочою частотою вібраційної площадки. Фазове налаштування є важливим інструментом для синхронізації і стабілізації частоти в системах автоматичного керування [17, 18]. У контексті вібраційних систем, які використовують привід від лінійних двигунів, така система керування дає змогу забезпечити точну фазову й частотну синхронізацію, необхідну для досягнення стабільної і ефективної роботи.

Система фазового керування порівнює фазу вхідного сигналу з фазою сигналу генератора синхронізації, причому фаза сигналу останнього регулюється для досягнення синхронізації. Функціональна схема системи керування зображена на рис. 9.



Рис. 9. Схема фазового налаштування частоти

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, № 1 (13) 2025 Щоб дослідити перехідні процеси під час роботи вібраційного приводу, проведемо моделювання запропонованої системи керування в умовах зміни маси матеріалу, що обробляється.

Модель системи керування, розроблена в середовищі Matlab/Simulink, показана на рис. 10. Тут лінійний двигун із постійними магнітами (блок Vibrator) живиться від інвертора (блок Mosfet Bridge) виконаного на польових транзисторах. Сигнали керування транзисторами формуються гістерезисним регулятором струму (блок Current Controller), який порівнює поточне значення струму двигуна (is) із заданим значенням (is*) на виході регулятора фази (блок Phase Controller). Структура цього блоку показана на рис. 11. Входом блоку є поточне значення прискорення. Регулятор автоматично підлаштовує частоту вихідного струму так, щоб його фаза відрізнялася від фази переміщення на заданий кут.



Рис. 10. Модель привода вібраційної площадки

Результати моделювання представлені на рис. 12, 13. Робоча частота вібратора (рис. 12) змінюється регулятором під час зміни маси матеріалу та платформи від 200 кг, на момент запуску, до 80 кг наприкінці розрахункового періоду часу, що становить 30 с. Водночас фазовий кут між струмом двигуна та переміщенням бігуна ψ_X підтримується регулятором на рівні 91,5° (точка 1, див. табл. 2).



Рис. 11. Система фазового керування (блок Phase Controller)

Результати розрахунку миттєвих електромеханічних процесів показано на рис. 13.

Для налаштування наступного робочого режиму (точка 2, див. табл. 2) врахуємо, що фазова характеристика переміщення бігуна в околиці цієї точки є суттєво нелінійною і немонотонною. Тому в ролі вхідного сигналу будемо використовувати прискорення платформи з налаштуванням на фазу її переміщення. Результати розрахунку перехідного процесу показано на рис. 14. Тут маса платформи змінюється так само, як і в попередньому режимі. Система керування підтримує стале значення фази переміщення платформи ψ_{Xp} на рівні 131,42°.



площадки в часі (m_p , кг); фазовий кут переміщення бігуна ($\psi_X = 91,5^\circ$)



На відміну від попереднього режиму, робоча частота тут суттєво менша. Також меншим є частотний діапазон регулювання. Результати розрахунку миттєвих електромеханічних процесів показано на рис. 15, звідки видно, що амплітуда переміщення платформи залишається майже постійною.



платформи ($\psi_{Xp} = 131, 42^{\circ}$)

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, № 1 (13) 2025



Оскільки система керування струмом двигуна підтримує його сталим (див. рис. 13, 15), зміна навантаження не впливає на значення електромагнітної сили (3). Натомість, під час такого керування, зміна частоти буде впливати на амплітуду переміщення (і прискорення) бігуна та платформи. Тому в разі, коли значення прискорення є критичним параметром для технологічного процесу, у систему має бути додано відповідний регулятор так, щоб його вихідним сигналом було значення струму на вході регулятора струму. За такої структури системи керування, потужність двигуна має бути збільшена для забезпечення потрібного діапазону регулювання струму.

Висновки. У роботі розроблено систему фазового керування вібраційної площадки з приводом від лінійного двигуна з постійними магнітами. Проведено моделювання такої системи в програмному пакеті Matlab/Simulink та досліджено її перехідні процеси.

Визначено частотні режими, що відповідають точкам максимальної механічної потужності двигуна та платформи, а також досліджено роботу системи керування під час зміни маси матеріалу віброплощадки.

Отримані результати свідчать, що запропонована система фазового керування робочою частотою лінійного електропривода вібраційної площадки дає змогу автоматично налаштовувати режим роботи системи за умови змінних параметрів навантаження. Це забезпечує більш ефективну роботу приводу в режимах, коли механічна потужність електромеханічної системи є максимальною.

Недоліком розробленої системи є порівняно складний алгоритм керування, який вимагає використання процесорів реального часу. Крім того, через те, що фазова характеристика переміщення є нелінійною, система чутлива до початкової частоти в момент запуску. Тому напрямом подальших досліджень є оптимізація системи керування та її практична реалізація з побудовою прототипу.

Список літератури

 Gurskyi V., Korendiy V., Krot P., Dyshev O. Determination of kinematic and dynamic characteristics of a reversible vibratory conveyor with an electromagnetic drive. Vibroengineering Procedia. 2024. Vol. 55. Pp. 138-144. DOI: 10.21595/vp.2024.24403.

- Korendiy V., Kachur O., Hurey I., Predko R., Palash R., Havrylchenko O. Modelling and experimental investigation of the vibratory conveyor operating conditions. Vibroengineering Procedia. 2022. Vol. 47. Pp. 1-7. DOI: 10.21595/vp.2022.23057.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu., Markov A.V. Mathematical model of the technological vibratory unit with electromagnetic excitation. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 661. 6 p. DOI:10.1088/1742-6596/1661/1/012063.
- Bespalov A., Svidrak I., Boiko O. Improving the performance of vibration feeders with an electromagnetic vibration drive and a combined vibration system. Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies. 2020. Vol. 22, no. 93. Pp. 26-30. DOI: 10.32718/nvlvet-f9305.
- Uncini A. Vibrating Systems. In: Digital Audio Processing Fundamentals. Springer Topics in Signal Processing. 2022. Vol. 21. Pp. 1-99. DOI: 10.1007/978-3-031-14228-4_1.
- Nozhenko V., Bialobrzheskyi O., Rodkin D., Druzhynina V., Yakymets S. The system of forming the control mode of the electric drive during the start-up of the vibration machine. World Science. 2021. Vol. 7, no. 68. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/30072021/7639.
- Bondar R.P. Resonant modes of a linear permanent magnet vibratory motor. Технічна електродинаміка. 2022. №4. С. 28-35. DOI:10.15407/techned2022.04.028.
- Cherno A.A. Control of electromagnetic vibratory drive using a phase difference between current hurmonics. Journal of Automation and Information Sciences. 2017. Vol. 49, no. 7. Pp. 58-76. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i7.50.
- Чубик Р.В., Зелінський І.Д., Деревенько І.А. Спосіб стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин за допомогою нейромережевого під-регулятора. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2021. Вип. 55. С. 52-61. DOI: 10.23939/istcipa2021.55.052.
- Черно О.О., Іванов А.В. Автоматичне керування електромагнітним вібраційним приводом з імпульсним живленням обмоток вібратора. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2023. №3. С. 49-55. DOI: 10.32782/2072-2052.2023.3.62.5.
- Gursky V.M., Kuzio I.V., Lanets O.S., Kisała P., Tolegonova A., Syzdykpaeva A. Implementation of dual-frequency resonant vibratory machines with pulsed electromagnetic drive. Przegląd elektrotechnsczny. 2019. No 4. Pp. 41-46. DOI: 10.15199/48.2019.04.08.
- Despotovic D.Z., Ribic A. The increasing energy efficiency of the vibratory conveying drives with electromagnetic excitation. International journal of electrical power & energy systems. 2012. No. 6(1). Pp. 38-42. DOI: 010.3923/ijepe.2012.38.42.
- Panovko G., Shokhin A., Eremeykin S. Simulation of control system for resonant vibrating machines with two unbalanced exciters. Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 8. Pp 174-178.
- Sinik V., Despotovic Z., Palinkas I. Optimization of the operation and frequency control of electromagnetic vibratory feeders. Elektronika ir Elektrotechnika. 2016. Vol. 22, no. 1. Pp. 24-30. DOI: 10.5755/j01.eee.22.1.14095.
- Бондар Р.П. Оптимізаційний підхід до визначення конструктивних параметрів лінійного магнітоелектричного двигуна вібраційної дії. Технічна електродинаміка. 2022. №1. С. 33-40. DOI:10.15407/techned2022.01.033.
- Подольцев О.Д, Бондар Р.П. Моделювання пов'язаних електромеханічних та теплових процесів в лінійному магнітоелектричному двигуні на основі теорії мультифізичних кіл. Технічна електродинаміка. 2020. №2. С. 50-55. DOI: 10.15407/techned2020.02.050.
- Hanane Sefraoui, Khalid Salmi, Abdelhak Ziyyat. Basic concepts of a phase-locked loop control system. International journal of online and biomedical engineering. 2022. Vol. 18, no. 13. Pp. 25-37. DOI: 10.3991/ijoe.v18i13.33419.
- 18 Sánchez-Herrera R., Andújar J.M., Márquez M., Mejías A., Gómez-Ruiz G. Self-Tuning PLL: A new, easy, fast and highly efficient phase-locked loop algorithm. In IEEE Transactions on energy conversion. 2022. Vol. 37, no. 2. Pp. 1164-1175. DOI: 10.1109/TEC.2021.3126807.

References (transliterated):

1. Gurskyi V., Korendiy V., Krot P., Dyshev O. Determination of

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, № 1 (13) 2025

kinematic and dynamic characteristics of a reversible vibratory conveyor with an electromagnetic drive. Vibroengineering Procedia. 2024. Vol. 55. Pp. 138-144. DOI: 10.21595/vp.2024.24403.

- Korendiy V., Kachur O., Hurey I., Predko R., Palash R., Havrylchenko O. Modelling and experimental investigation of the vibratory conveyor operating conditions. Vibroengineering Procedia. 2022. Vol. 47. Pp. 1-7. DOI: 10.21595/vp.2022.23057.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu., Markov A.V. Mathematical model of the technological vibratory unit with electromagnetic excitation. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 661. 6 p. DOI:10.1088/1742-6596/1661/1/012063.
- Bespalov A., Svidrak I., Boiko O. Improving the performance of vibration feeders with an electromagnetic vibration drive and a combined vibration system. Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies. 2020. Vol. 22, no. 93. Pp. 26-30. DOI: 10.32718/nvlvet-f9305.
- Uncini A. Vibrating Systems. In: Digital Audio Processing Fundamentals. Springer Topics in Signal Processing. 2022. Vol. 21. Pp. 1-99. DOI: 10.1007/978-3-031-14228-4 1.
- Nozhenko V., Bialobrzheskyi O., Rodkin D., Druzhynina V., Yakymets S. The system of forming the control mode of the electric drive during the start-up of the vibration machine. World Science. 2021. Vol. 7, no. 68. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/30072021/7639.
- Bondar R.P. Resonant modes of a linear permanent magnet vibratory motor. Tekhnichna elektrodynamika. 2022. No. 4. C. 28-35. DOI:10.15407/techned2022.04.028.
- Cherno A.A. Control of electromagnetic vibratory drive using a phase difference between current hurmonics. Journal of Automation and Information Sciences. 2017. Vol. 49, no. 7. Pp. 58-76. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i7.50.
- Chubyk R.V., Zelinskyi I.D., Derevenko I.A. Sposib stabilizatsii tekhnolohichno optymalnykh parametriv vibratsiinoho polia adaptyvnykh vibratsiinykh tekhnolohichnykh mashyn za dopomohoiu neiromerezhevoho pid-rehuliatora. Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni. 2021. Issue. 55. Pp. 52-61. DOI: 10.23939/istcipa2021.55.052.
- 10. Cherno O.O., Ivanov A.V. Avtomatychne keruvannia elektromahnitnym vibratsiinym pryvodom z impulsnym

zhyvlenniam obmotok vibratora. Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. 2023. No. 3. C. 49-55. DOI: 10.32782/2072-2052.2023.3.62.5.

- Gursky V.M., Kuzio I.V., Lanets O.S., Kisała P., Tolegonova A., Syzdykpaeva A. Implementation of dual-frequency resonant vibratory machines with pulsed electromagnetic drive. Przegląd elektrotechnsczny. 2019. No 4. Pp. 41-46. DOI: 10.15199/48.2019.04.08.
- Despotovic D.Z., Ribic A. The increasing energy efficiency of the vibratory conveying drives with electromagnetic excitation. International journal of electrical power & energy systems. 2012. No. 6(1). Pp. 38-42. DOI: 010.3923/ijepe.2012.38.42.
- Panovko G., Shokhin A., Eremeykin S. Simulation of control system for resonant vibrating machines with two unbalanced exciters. Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 8. Pp 174-178.
- Sinik V., Despotovic Z., Palinkas I. Optimization of the operation and frequency control of electromagnetic vibratory feeders. Elektronika ir Elektrotechnika. 2016. Vol. 22, no. 1. Pp. 24-30. DOI: 10.5755/j01.eee.22.1.14095.
- Bondar R.P. Optymizatsiinyi pidkhid do vyznachennia konstruktyvnykh parametriv liniinoho mahnitoelektrychnoho dvyhuna vibratsiinoi dii. Tekhnichna elektrodynamika. 2022. No. 1. Pp. 33-40. DOI:10.15407/techned2022.01.033.
- Podoltsev O.D, Bondar R.P. Modeliuvannia pov'iazanykh elektromekhanichnykh ta teplovykh protsesiv v liniinomu mahnitoelektrychnomu dvyhuni na osnovi teorii multyfizychnykh kil. Tekhnichna elektrodynamika. 2020. No. 2. Pp. 50-55. DOI: 10.15407/techned2020.02.050.
- Hanane Sefraoui, Khalid Salmi, Abdelhak Ziyyat. Basic concepts of a phase-locked loop control system. International journal of online and biomedical engineering. 2022. Vol. 18, no. 13. Pp. 25-37. DOI: 10.3991/ijoe.v18i13.33419.
- Sánchez-Herrera R., Andújar J.M., Márquez M., Mejías A., Gómez-Ruiz G. Self-Tuning PLL: A new, easy, fast and highly efficient phase-locked loop algorithm. In IEEE Transactions on energy conversion. 2022. Vol. 37, no. 2. Pp. 1164-1175. DOI: 10.1109/TEC.2021.3126807.

Надійшла (received) 15.04.25

Відомості про авторів / About the authors

Бондар Роман Петрович (Bondar Roman Petrovych) – доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки та електроприводу, Київський національний університет будівництва і архітектури; м. Київ, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0198-5548; e-mail: bondar.rp@knuba.edu.ua.

Голенков Геннадій Михайлович (Holenkov Hennadii Mykhailovych) – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки та електроприводу, Київський національний університет будівництва і архітектури; м. Київ, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4468-3301; e-mail: golenkov.gm@knuba.edu.ua.

Бондар Олег Сергійович (Bondar Oleh Serhiiovych) – студент, Київський національний університет будівництва і архітектури; м. Київ, Україна; e-mail: bondar os@knuba.edu.ua.