

*Р. П. БОНДАР, Г. М. ГОЛЕНКОВ*

### МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЛІНІЙНОГО МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА ПРИВОДА ОДНОМАСОВОЇ ВІБРОУДАРНОЇ СИСТЕМИ

Розглянуто лінійний магнітоелектричний двигун вібраційної дії циліндричної топології у віброударному режимі роботи. Запропоновано модель для дослідження електромеханічних процесів в одномасовій віброударній системі з приводом від лінійного двигуна, що ґрунтується на схемі заміщення із зосередженими параметрами. Електричні параметри моделі є залежними від робочої частоти та враховують магнітні втрати в осерді двигуна. Визначення параметрів розрахункової схеми проводилось на підставі польового розрахунку за допомогою методу скінченних елементів. Внаслідок осової симетрії машини, задача розглядалась в осесиметричній постановці, за допомогою рівнянь квазістационарного магнітного поля в часовій області, що дозволило врахувати ефект протікання вихрових струмів в масивних полюсах якоря двигуна. Визначення магнітних втрат проводилось експериментальним шляхом, за допомогою дослідного зразка магнітоелектричного лінійного двигуна вібраційної дії. Параметри механічної схеми заміщення визначались експериментально, із застосуванням методу згасаючих коливань та безпосереднім зважуванням елементів конструкції. Для моделювання сили удару приймається сила контактної взаємодії, що описується формулою Герца. Вирішення рівнянь динаміки системи проводилось засобами структурного моделювання в середовищі Simulink/Matlab. Виконано розрахунок характеристик електромеханічної системи в залежності від параметрів ударного навантаження та робочої частоти. З метою перевірки розрахункової моделі, проведено експериментальні дослідження електромеханічних характеристик системи за допомогою дослідного зразка магнітоелектричного двигуна, що працює у віброударному режимі роботи, та виконано порівняльний розрахунок на підставі розробленої моделі.

**Ключові слова:** віброударна система, електромеханічні характеристики, лінійний магнітоелектричний двигун, метод скінченних елементів, схема заміщення, формула Герца.

*Р. П. БОНДАР, Г. М. ГОЛЕНКОВ*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛИНЕЙНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ОДНОМАССОВОЙ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрен линейный магнитоэлектрический двигатель вибрационного действия цилиндрической топологии при виброударном режиме работы. Предложена модель для исследования электромеханических процессов в одномассовой виброударной системе с приводом от линейного двигателя, которая основана на схеме замещения с сосредоточенными параметрами. Электрические параметры модели являются зависимыми от рабочей частоты и учитывают магнитные потери в сердечнике двигателя. Определение параметров расчетной схемы производилось на основании полевого расчета с помощью метода конечных элементов. Вследствие осевой симметрии машины, задача рассматривалась в осесимметричной постановке, с помощью уравнений квазистационарного магнитного поля во временной области, что позволило учесть эффект протекания вихревых токов в массивных полюсах якоря двигателя. Определение магнитных потерь производилось экспериментальным путем, с помощью опытного образца магнитоэлектрического линейного двигателя вибрационного действия. Параметры механической схемы замещения определялись экспериментально, с использованием метода затухающих колебаний и непосредственным взвешиванием элементов конструкции. Для моделирования силы удара принимается сила контактного взаимодействия, которая описывается формулой Герца. Решение уравнений динамики системы производилось средствами структурного моделирования в среде Simulink/Matlab. Выполнен расчет характеристик электромеханической системы в зависимости от параметров ударной нагрузки и рабочей частоты. С целью проверки расчетной модели, выполнены экспериментальные исследования электромеханических характеристик системы с помощью опытного образца магнитоэлектрического двигателя, который работает в виброударном режиме, и выполнен сравнительный расчет на основании разработанной модели.

**Ключевые слова:** виброударная система, электромеханические характеристики, линейный магнитоэлектрический двигатель, метод конечных элементов, схема замещения, формула Герца.

*R. P. BONDAR, H. M. HOLENKOV*

### MODELING OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES OF THE LINEAR PERMANENT MAGNET MOTOR DRIVE OF THE ONE-MASS VIBRO-IMPACT SYSTEM

The paper presents the tubular linear permanent magnet vibratory motor at a vibro-impact operating mode. The model for research of electromechanical processes in the one-mass vibro-impact system with the linear permanent magnet motor drive, which is founded on an equivalent circuit with the lumped parameters, is offered. Electric parameters of the model are dependent on operating frequency and consider magnetic losses in the motor core. Determination of calculation scheme parameters was made on the basis of field calculation by means of a finite element method. Owing to an axial motor symmetry the problem was considered in axisymmetric approach, by means of the equations of a quasi-stationary magnetic field in a time domain that has allowed considering the eddy currents in massive poles of the motor anchor. Determination of magnetic losses was made experimentally, by means of a prototype of the linear permanent magnet vibratory motor. Mechanical equivalent circuit parameters were determined experimentally, by means of the damped oscillation method and with the help of direct weighing of construction elements. We applied the Hertz's formula for modeling of an impact force. The solution of the system dynamic equations was made by means of structural modeling in the Simulink/Matlab software package. Furthermore, we calculated characteristics of the one-mass electromechanical system in dependence of the impact parameters and operating frequency. For the validation of the calculation model, experimental studies of electromechanical characteristics of system with use of a prototype of the linear permanent magnet motor, which works in vibro-impact mode, are executed. Comparative calculation by means of the developed model is executed.

**Keywords:** electromechanical characteristics, equivalent circuit, finite element method, Hertz's formula, linear permanent magnet motor, vibro-impact system.

**Вступ.** Вібраційні технології є основою багатьох сучасних технологічних процесів пов'язаних з переміщенням та обробкою матеріалів, ущільненням, сортуванням, гранулюванням та ін. Лінійні магнітоелектричні машини використовуються у випробувальних та калібрувальних стендах, віброізоляційних платформах, для поглинання енергії ударів в підвісках автомобілів [1, 2] тощо. В залежності від призначення, такі пристрої можуть як утворювати вібраційні навантаження, так і навпаки, їх зменшувати.

Застосування лінійних магнітоелектричних двигунів (ЛМД) вібраційної дії в приводах будівельних машин забезпечує низку переваг, основними з яких є широкий частотний робочий діапазон, відсутність механічних передач, а отже надійність і низький рівень шуму, можливість регулювання експлуатаційних характеристик в автоматичному режимі.

Використання вібраційних та віброударних пристроїв з приводом від лінійних двигунів має свої особливості, які визначаються характером робочого процесу. Для того, щоб вібратор виконував певну технологічну операцію (ущільнення, перемішування тощо), необхідно забезпечити відповідність електромеханічних характеристик ЛМД вимогам робочого процесу.

Дослідженням та розрахункам характеристик ЛМД вібраційної дії присвячено низку праць. Значна увага, під час дослідження таких систем, приділялась аналізу поведінки приводу в залежності від параметрів ЛМД та робочої частоти, тобто частотним характеристикам. Як правило, такі системи розглядаються як одномасові, з лінійним навантаженням пружного чи в'язкого типу [3]. При цьому параметри схем заміщення можуть вважатись сталими [4, 5], або бути залежними від частоти [6].

Разом з тим, робота ЛМД на нелінійне навантаження, зокрема ударного типу, не має достатнього відображення в літературі. Тому актуальним є питання створення математичних моделей ЛМД у віброударному режимі роботи, та дослідження, з їх допомогою, особливостей електромеханічних процесів приводу в залежності від параметрів ударного навантаження.

**Метою роботи** є розробка математичної моделі для розрахунку електромеханічних характеристик ЛМД вібраційної дії із навантаженням ударного типу, та дослідження впливу параметрів навантаження на характеристики машини.

**Розрахункова модель віброударної системи з лінійним електроприводом.** Електрична схема заміщення. В якості збудника періодичної електромагнітної сили  $F_{ev}$  розглядається циліндричний лінійний магнітоелектричний двигун вібраційної дії з гладкою (беззубцевою) структурою статора (рис. 1, а). ЛМД має осердя 1, виконане з шихтованої електротехнічної сталі, та обмотку 2 з двох котушок. Якір машини містить намагнічений в осьовому напрямку постійний магніт 3 та два масивні полюси 4, виконані з конструкційної сталі.

В даному ЛМД, з метою забезпечення вібраційної стійкості та спрощення конструкції, полюси якоря виконані масивними з конструкційної сталі. Це зумовлює наявність вихрових струмів, що необхідно вра-

ховувати під час розрахунку характеристик двигуна. Відповідні магнітні втрати можуть бути подані дією еквівалентного опору, що характеризує розсіювання енергії в полюсах.

Електрична схема заміщення двигуна представлена на рис. 1, б, де  $R_{sv}$ ,  $L_v$  – відповідно активний опір та індуктивність обмотки статора,  $e$  – ЕРС руху якоря,  $R_{mag}$  – активний опір, що відповідає магнітним втратам в осерді.

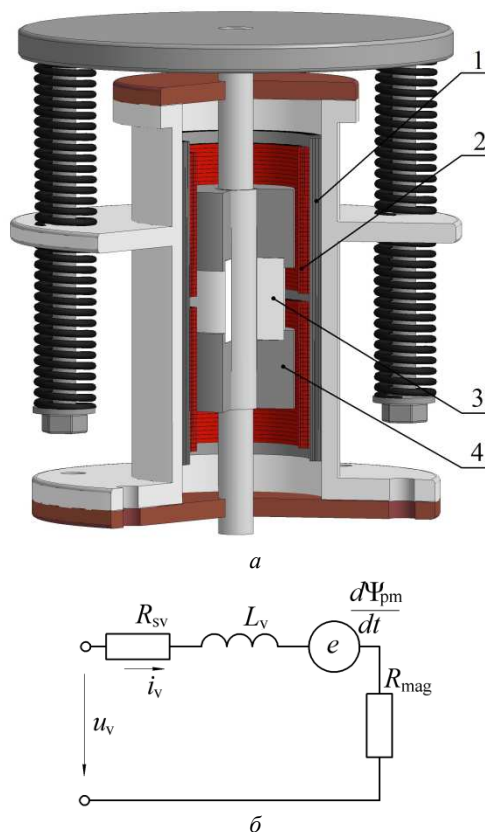


Рис. 1. Загальний вигляд ЛМД вібраційної дії (а) та його електрична схема заміщення (б)

В схемі заміщення опір обмотки статора  $R_{sv}$  приймається сталим. Індуктивність обмотки  $L_v$  є функцією переміщення якоря відносно статора, а також враховується її зміна в залежності від робочої частоти ЛМД. Передбачається, що розрахунок характеристик віброударної системи (ВУС) проводиться для сталого значення струму в обмотці ЛМД, тому опір  $R_{mag}$  приймається залежним тільки від робочої частоти.

ЕРС руху якоря дорівнює  $e = \frac{d\Psi_{pm}}{dt}$ , де  $\Psi_{pm}$  – потокозчеплення обмотки статора, зумовлене полем постійних магнітів, і яке є функцією положення якоря.

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

$$u_v = i_v(R_{sv} + R_{mag}) + L_v \frac{di_v}{dt} + \frac{dL_v}{dx} \frac{dx}{dt} i_v + \frac{d\Psi_{pm}}{dx} \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

де  $u_v$ ,  $i_v$  – відповідно напруга та струм обмотки двигуна;

$x$  – переміщення якоря відносно статора.

За наведеної конструкції ЛМД (коли відсутні зуб-

цеві гармоніки та міжзубцеві сили зчеплення), електромагнітну силу можливо виразити через похідну від магнітної енергії

$$F_{ev} = \left. \frac{\partial W_m}{\partial x} \right|_{i_v = \text{const}} = \frac{d\Psi_{pm}}{dx} + \frac{1}{2} \frac{dL_v}{dx} i_v^2. \quad (2)$$

**Механічна схема заміщення.** Існує значна кількість різних динамічних схем віброударних машин, які застосовуються у будівництві [7]. В одномасовій схемі (рис. 2) ЛМД вібраційної дії 1, за допомогою ударника 2, періодично здійснює удари по демпферу 3. Між ударником та демпфером має місце попередній зазор  $\Delta$ . Система здійснює переміщення під дією періодичної електромагнітної сили  $F_{ev}$ .

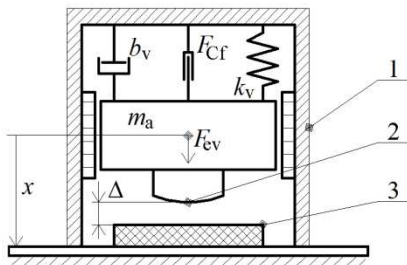


Рис. 2. Механічна схема ВУС

В якості вихідних припущень приймаються наступні:

коливальні маси являють собою абсолютно жорсткі тіла;

поведінка пружних елементів описується законом Гука, тобто їх жорсткість є постійною величиною;

система знаходиться в положенні механічної рівноваги, коли існує статична рівновага між силою тяжіння та силами пружності;

удар є прямим і центральним, тобто вектор швидкості та нормалі до поверхні тіл в точці зіткнення проходить через їх центри мас.

Якщо прийняти за початок координати переміщення положення механічної рівноваги системи (положення якоря за відсутності сили  $F_{ev}$ ), то наведеній механічній схемі відповідає наступне рівняння руху:

$$m_a \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{ev} - k_v x - b_v \frac{dx}{dt} - F_{im} - F_{cf} \text{sign} \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

де  $m_a$  – маса якоря двигуна;

$x$  – переміщення якоря двигуна відносно статора;

$k_v$  – коефіцієнт жорсткості пружної підвіски двигуна;

$b_v$  – коефіцієнт в'язкого тертя, який враховує механічні втрати в двигуні;

$F_{im}$  – сила удару;

$F_{cf}$  – сила сухого кулонівського тертя.

Для моделювання сили удару приймається сила контактної взаємодії, що описується формулою Герца [8]

$$F_{im} = K_{im} \alpha^{3/2}, \quad (4)$$

де  $\alpha = x - \Delta$  – відносне зближення тіл;

$K_{im} = \frac{4}{3(\delta_1 + \delta_2) \sqrt{A+B}}$  – стала, яка враховує властивості матеріалів;

$q, A, B$  – константи, що характеризують геометрію зони контакту;

$$\delta_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1 \pi}, \delta_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{E_2 \pi};$$

$\mu_1, \mu_2, E_1, E_2$  – відповідно коефіцієнти Пуассона та модулі Юнга для обох тіл.

Для випадку, коли ударник має форму сфери з радіусом  $R_1$ , а обмежник являє собою плоску поверхню,  $A = B = 1/2R_1, q = 0,318$  [9].

Сила удару  $F_{im}$  дорівнює виразу (4) коли  $x > \Delta$ , і рівна нулю, якщо  $x \leq \Delta$ .

#### Визначення параметрів розрахункової моделі.

Для того, щоб виконати розрахунок характеристик ВУС, необхідно визначити параметри електричної та механічної схем заміщення.

В електричній схемі заміщення (див. рис. 1, б) активний опір обмотки статора – параметр, який досить легко отримати за допомогою відповідних вимірів. Інші параметри та залежності визначались за допомогою польового розрахунку з використанням методу скінчених елементів.

Оскільки індуктивність обмотки статора залежить від протікання вихрових струмів в масивних полюсах, то її розрахунок проводився за допомогою рівнянь квазістационарного електромагнітного поля в часовій області [10].

Потокозчеплення обмотки  $\Psi_s$  визначалось інтегруванням векторного магнітного потенціалу по її об'єму. Розрахунок проводився в осесиметричній геометрії для якої

$$\Psi_s = \sum_{n=1}^{n=2} \frac{w}{S_{coil}} \int_{S_{coil}} 2\pi r A_\varphi dS_{coil}, \quad (5)$$

де  $w$  – кількість витків у котушці;

$S_{coil}$  – площа перетину котушки;

$A_\varphi$  – значення магнітного векторного потенціалу ( $\varphi$  – компонента).

Розраховане потокозчеплення є сумою трьох складових

$$\Psi_s = \Psi_{pm} + L_s i_v + M i_a, \quad (6)$$

де  $L_s$  – власна індуктивність обмотки статора;

$M$  – взаємна індуктивність з еквівалентним контуром вихрових струмів;

$i_a$  – струм еквівалентного контуру.

Відповідно до схеми заміщення (див. рис. 1, б), індуктивність представлена еквівалентним параметром  $L_v$ , значення якого змінюється залежно від частоти, тобто вираз (6) запишеться у вигляді

$$\Psi_s = \Psi_{pm} + L_v i_v. \quad (7)$$

Індуктивність обмотки  $L_v$  визначалась з розрахункових залежностей потокозчеплення від синусоїдного струму в обмотці заданої частоти.

На рис. 3, а показано залежність потокозчеплення від струму обмотки з діючим значенням  $I_v = 3,2$  А та частотою 28 Гц, для положення якоря  $x = 0,005$  м. Як видно з рисунка, потокозчеплення має складову незалежну від струму (потокозчеплення поля постійних магнітів), та індуктивну складову. Відповідно до рівняння (7), розраховані значення коефіцієнтів, для цього випадку, будуть наступними:  $\Psi_{pm} = 0,0652$  Вб;  $L_v = 0,02154$  Гн.

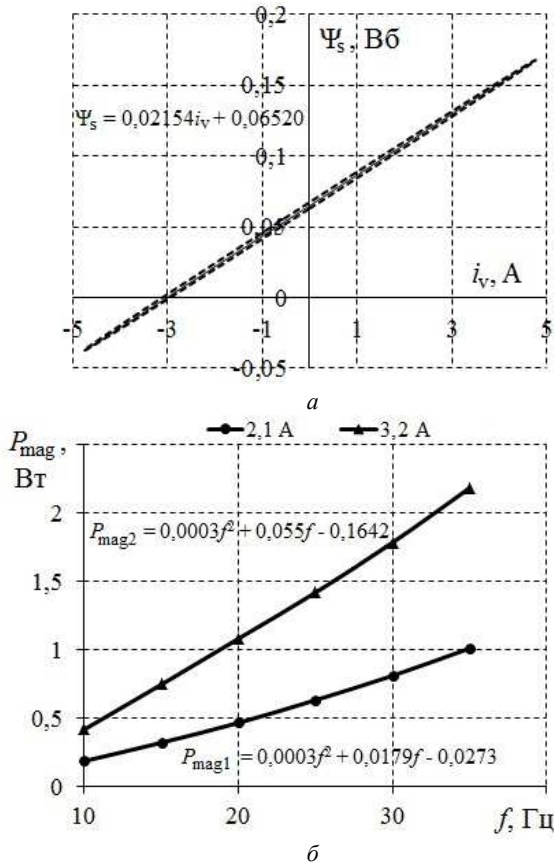


Рис. 3. Потокозчеплення обмотки статора (а) та потужність магнітних втрат (б) ЛМД

Розрахунок потокозчеплення проводився в діапазоні частот 10-30 Гц, та в різних положеннях якоря двигуна відносно статора –  $x$ , в межах  $-0,01-0,01$  м, що становить максимальну робочу амплітуду коливань ЛМД.

Передбачається, що розрахунок характеристик віброударної системи проводиться для сталого значення струму в обмотці ЛМД, тому індуктивність обмотки  $L_v$  вважається залежною тільки від робочої частоти та положення якоря.

Аналіз отриманих результатів дозволяє розрахува-

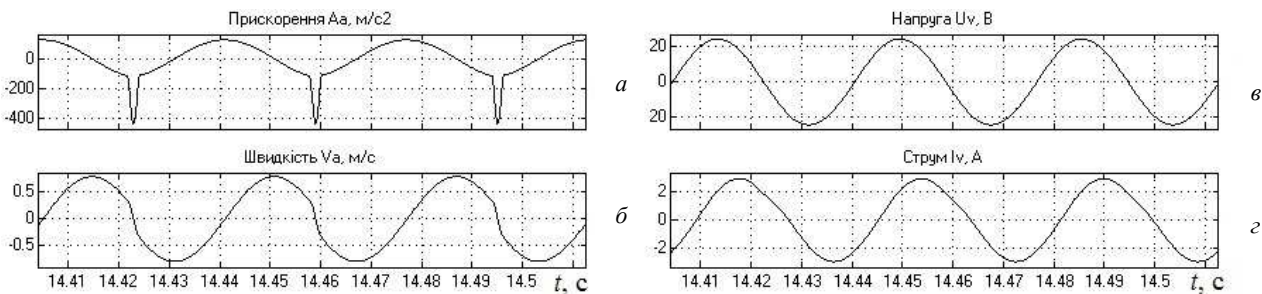


Рис. 4. Результати розрахунку моделі ВУС: а – прискорення якоря  $a_a$ , м/с<sup>2</sup>; б – швидкість якоря  $v_a$ , м/с; в – напруга двигуна  $u_v$ , В; г – струм двигуна  $i_v$ , А

Діаграми представлені для випадку діючого значення синусоїдного струму двигуна  $I_v = 2,1$  А, з частотою  $174 \text{ рад}^{-1}$ . Попередній зазор становить  $0,0045$  м.

Далі, під час моделювання електромеханічних характеристик двигуна, діючі значення струму та напруги визначаються згідно з результатами чисельного

ти значення коефіцієнту електромагнітної сили  $d\Psi_{pm}/dx$ , та індуктивність залежно від частоти та положення якоря.

Потужність магнітних втрат визначалась експериментальним шляхом, для заданого значення струму в обмотці ЛМД та частоти. Відповідні залежності для діючих значень струму обмотки  $2,1$  А та  $3,2$  А показані на рис. 3, б.

Визначення параметрів механічної схеми заміщення проводилось експериментально, із застосуванням методу згасаючих коливань [11] та безпосереднім зважуванням елементів конструкції.

В табл. 1 наведено вихідні значення параметрів для розрахунку за допомогою представлених вище схем заміщення.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку електромеханічних характеристик

Електрична схема заміщення	Коефіцієнт електромагнітної сили $d\Psi_{pm}/dx$ , Н/А	12,5
	Активний опір обмотки статора $R_{sv}$ , Ом	2,67
Механічні параметри ВУС	Маса якоря двигуна $m_a$ , кг	5,8
	Коефіцієнт в'язкого тертя $b_v$ , кг/с	32
	Сила сухого тертя $F_{cf}$ , Н	2,5
Коефіцієнти моделі удару	Коефіцієнт жорсткості пружної підвіски двигуна $k_v$ , Н/м	153291
	Радіус сфери ударника $R_1$ , м	0,2
	Коефіцієнт $q$	0,318
	Коефіцієнт Пуассона сталі (Ст3) $\mu_1$	0,3
	Модуль Юнга сталі (Ст3) $E_1$ , Па	200e9
	Коефіцієнт Пуассона текстоліту $\mu_1$	0,1
	Модуль Юнга текстоліту $E_2$ , Па	1,68e8

**Моделювання електромеханічних характеристик ЛМД при роботі на ударне навантаження.** Вирішення рівнянь (1)-(4) проводилось засобами структурного моделювання в середовищі Simulink/Matlab [12].

Часові діаграми, що ілюструють результати розрахунку моделі ВУС, показано на рис. 4.

рішення рівнянь (1)-(4) за виразами

$$U_v = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t u_v^2 dt} ; I_v = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i_v^2 dt} . \quad (8)$$

Обчислення активної потужності та коефіцієнту потужності здійснюється відповідно до наступних рівнянь



$$P_v = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t u_v i_v dt; PF_v = \frac{P_v}{U_v I_v} \quad (9)$$

На рис. 5 показано розраховані за допомогою представленої моделі криві потужності споживання  $P_v$ , напруги живлення двигуна  $U_v$ , коефіцієнту потужності  $PF_v$ , коефіцієнту гармонік струму  $THD$ , амплітуди прискорення  $A_{am}$  (максимальне за модулем значення), сили удару  $F_{im}$ , в залежності від значення попереднього зазору  $\Delta$  між ударником та демпфером.

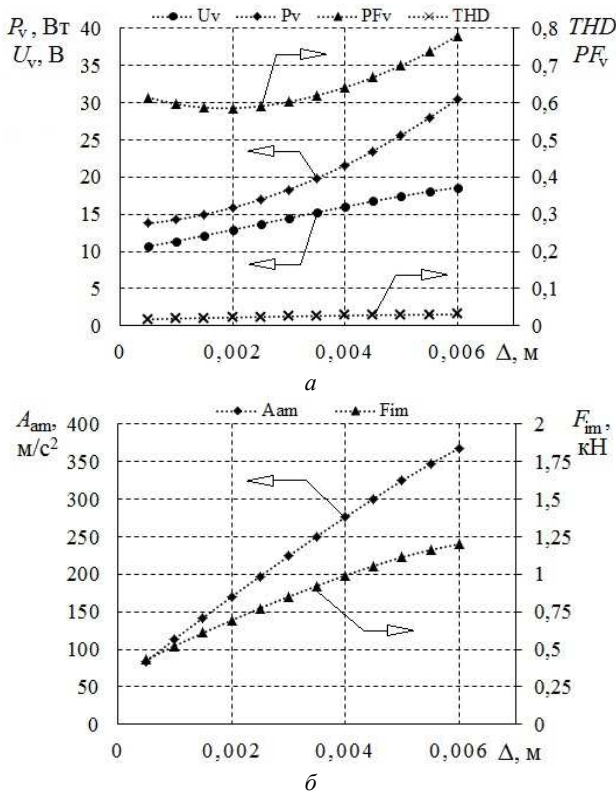


Рис. 5. Характеристики ВУС в залежності від попереднього зазору  $\Delta$

Коефіцієнт гармонік струму розраховувався на підставі виразу

$$THD = I_H / I_F'$$

де  $I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$  – діюче значення струмів гармонічних складових;

$I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2$  – діючі значення струмів другої, третьої, ... n гармонік;

$I_F'$  – діюче значення струму фундаментальної гармоніки.

Характеристики знімалися для сталого діючого значення струму двигуна  $I_v = 2,1$  А, з частотою  $167,8$  рад<sup>-1</sup>. Для попереднього зазору  $\Delta < 0,0005$  м, режим роботи є неефективним, тому дані для цієї ділянки на рис. 5 не приводяться. Максимальне значення попереднього зазору ( $\Delta = 0,006$  м) обмежується максимальною амплітудою коливань якоря за даних параметрів системи, струму та частоти.

Як свідчать отримані дані, збільшення зазору призводить до збільшення напруги живлення та потужності, що пояснюється зростанням амплітуди коливань та швидкості якоря, а отже, і ЕРС в рівнянні балансу напруг (1). Загалом, значення електричних величин, зі зростанням попереднього зазору, наближаються до

значень, що відповідають вібраційному режиму роботи. Також можна відмітити, що сила удару зростає зі збільшенням зазору.

**Експериментальне дослідження характеристик віброударної системи.** З метою перевірки розрахованої моделі, проводилися експериментальні дослідження за допомогою дослідного зразка магнітоелектричного двигуна вібраційної дії, що працює у віброударному режимі.

Механічна схема досліду відповідає наведеній на рис. 2. Корпус ЛМД вібраційної дії жорстко кріпиться на нерухому основу, а якор, з прикріпленим ударником, здійснює удари по нерухомому обмежнику плоскої форми.

Живлення двигуна 1 здійснюється від джерела синусоїдної напруги, реалізованого за допомогою генератора 2 та підсилювача 3 (рис. 6). Прискорення якоря  $a_a$  вимірюється датчиком прискорення  $AS_a$ . Для вимірювання струму  $i_v$  та напруги  $u_v$  обмотки двигуна, використовуються датчики  $CS$  та  $VS$ , відповідно. Сигнали вимірюваних величин подаються на модуль збору даних 4, й у цифровій формі передаються на комп'ютер 5, який виконує функцію реєстратора.

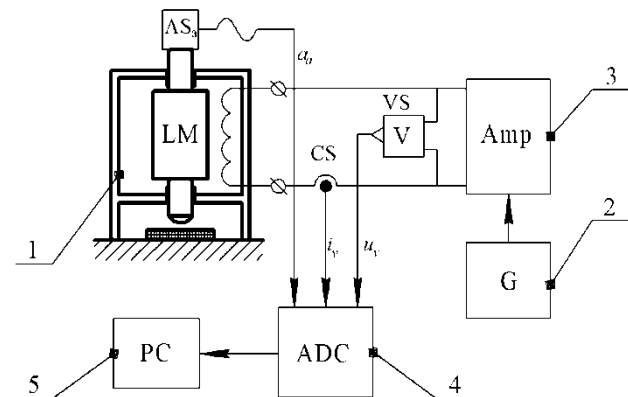
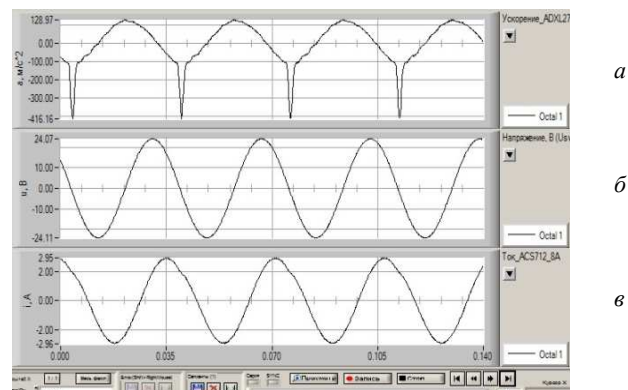


Рис. 6. Дослідна установка

На рис. 7 представлено експериментальні часові діаграми характеристик ВУС для частоти  $\omega = 174$  рад<sup>-1</sup>, діючого значення струму  $I_v = 2,1$  А та попереднього зазору  $\Delta = 0,045$  м. Значення фізичних величин відкалібровані відповідно до чутливості вимірювальних датчиків.

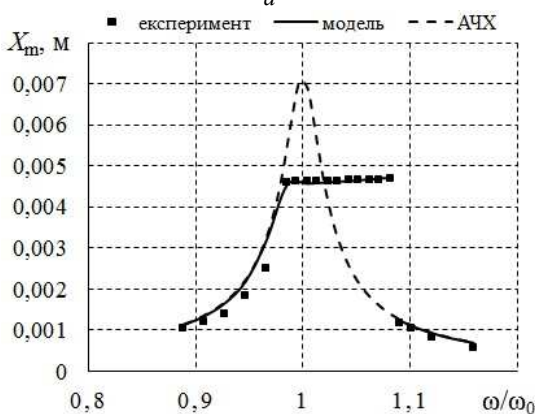
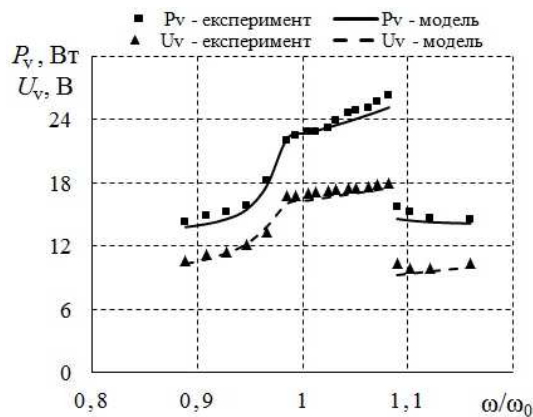


а – прискорення якоря  $a_a$ ,  $m/s^2$ ; б – напруга  $u_v$ , В; в – струм  $i_v$ , А

Рис. 7. Експериментальні часові діаграми

Як видно з рисунку, характер миттєвих електро-механічних процесів, отриманих експериментальним шляхом, добре узгоджується з результатами наведеними на рис. 4, які розраховані для тих самих параметрів ВУС.

Дані, виміряні за допомогою дослідної установки, експортувались до програмного забезпечення Matlab та оброблялись з метою приведення вихідних сигнала



лів датчиків до одиниць вимірюваних фізичних величин, а також для розрахунків характеристик.

Результати експериментальних досліджень ВУС, виконані за допомогою представленої установки, показано на рис. 8 (маркером). Обробка отриманих даних здійснювалась програмним забезпеченням відповідно до наступних умов.

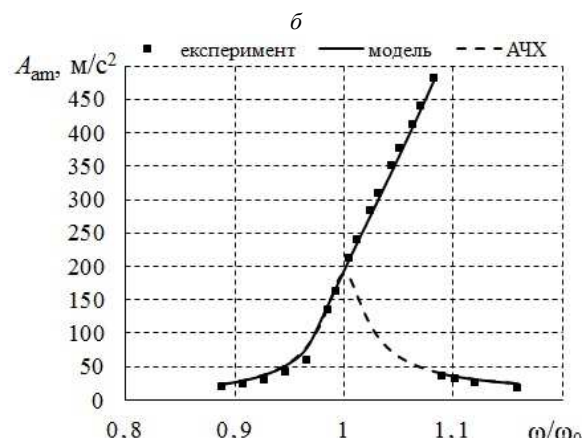
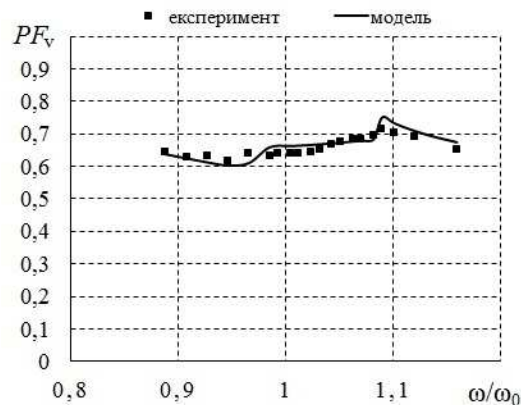


Рис. 8. Характеристики ВУС

Характеристики відповідають режиму, коли всі електромеханічні процеси в системі є усталеними.

Обчислення діючого значення напруги  $U_v$ , потужності  $P_v$  (рис. 8, а) та коефіцієнту потужності  $PF_v$  (рис. 8, б), здійснювалось згідно виразів (8), (9).

Амплітуда коливань якоря  $X_m$  (рис. 8, в) для вібраційного режиму, розраховувалась за першою гармонікою миттєвого значення прискорення якоря, згідно виразу

$$|X_m| = \frac{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}{\omega^2},$$

де

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t a_a \cos(n\omega t) dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t a_a \sin(n\omega t) dt$$

– коефіцієнти ряду Фур'є;

$n$  – порядок гармоніки (тут  $n = 1$ );

$T = 1/f$  – період;

$\omega$  – частота коливань.

Для віброударного режиму цей показник визначається як максимальне додатне значення, що відповідає руху якоря в напрямку демпфера (див. рис. 2).

Амплітуда прискорення  $A_{am}$  (рис. 8, г) визначається як максимальне за модулем значення прискорення

якоря.

Характеристики знімались для сталого значення струму двигуна –  $I_v = 2,1$  А, й показано в залежності від відносної частоти  $\omega/\omega_0$ , де  $\omega_0 = \sqrt{k_v/m_a}$  – власна частота механічної системи ЛМД. Попередній зазор становить  $\Delta = 0,0045$  м. Під час виконання серії дослідів, частота коливань поступово збільшувалась від значення  $0,89\omega_0$  до  $1,16\omega_0$ .

Ділянка  $\omega/\omega_0 \approx 0,98 - 1,08$  відповідає ударному режиму, на інших частотах режим є вібраційним.

При цьому, як видно з рис. 8, в, г (тут штриховою лінією показано розрахункову АЧХ для суто вібраційного режиму), віброударний режим зберігається навіть тоді, коли у вібраційному режимі амплітуда коливань є меншою за попередній зазор. Це зумовлює розширення діапазону робочої частоти у віброударному режимі, підвищення максимального значення прискорення, а також частоти на якій воно має місце (див. рис. 8, г).

Досить добре узгодження експериментальних механічних характеристик ВУС (амплітуди коливань та прискорення) з розрахунковими, свідчить про те, що

моделювання удару за допомогою нелінійної в'язкопружної моделі Герца дозволяє точно врахувати характеристики ударних тіл.

Як видно з рис. 8, результати експериментальних досліджень узгоджуються з характеристиками, розрахованими згідно представленої вище моделі, що показані лініями. Отже, розроблена модель може використовуватись для розрахунку електромеханічних процесів віброударних машин з приводом від ЛМД вібраційної дії.

**Висновки.** Запропонована модель дозволяє проводити розрахунки електромеханічних процесів у одномасовій віброударній системі з приводом від лінійного магнітоелектричного двигуна.

Дія ударного навантаження зумовлює виникнення асиметричних режимів коливань, що характеризуються значними прискореннями робочого органу за невеликих значень частоти.

Як свідчать отримані за допомогою розробленої моделі дані, збільшення попереднього зазору між якорем та демпфером призводить до збільшення напруження живлення та потужності споживання ЛМД, що пояснюється зростанням амплітуди коливань та швидкості якоря. При цьому, значення електричних величин наближаються до значень, що відповідають вібраційному режиму роботи.

Вплив ударного навантаження на механічні характеристики ВУС виявляється в розширенні робочого частотного діапазону ЛМД, підвищенні максимального значення прискорення, а також частоти на якій воно має місце. При цьому віброударний режим зберігається навіть тоді, коли у вібраційному режимі амплітуда коливань є меншою за попередній зазор.

#### Список літератури

1. Oprea R. A., Mihailescu M., Chirila A. I., Deaconu I. D. Design and efficiency of linear electromagnetic shock absorbers. *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*. Brasov, 2012, pp. 630-634. doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231813.
2. Wang J., Wang W., Atallah K., Howe D. Design of a linear permanent magnet motor for active vehicle suspension. *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, 2009, pp. 585-591. doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075265.
3. Бондар Р. П., Голєнков Г. М., Литвин О. Ю., Подольцев О. Д. Моделювання енергетичних характеристик вібратора з лінійним електричним приводом // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013, № 2. С. 66-74.
4. Yatchev I., Gueorgiev V., Ivanov, R., Hinov K. Simulation of the Dynamic Behaviour of a Permanent Magnet Linear Actuator. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*. 2010. doi: 23.10.2298/FUEE1001037Y.
5. 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:10.20998/2074-272X.2019.1.02.
6. Бондар Р. П., Подольцев О. Д. Комплексна модель з частотно-залежними параметрами для розрахунку робочих характеристик магнітоелектричного вібратора // *Технічна електродинаміка*. 2017, № 1. С. 44-51. doi: 10.15407/techned2017.01.044.

7. Булгаков В. М., Черниш О. М., Березовий М. Г., Яременко В. В. *Проектування машин вібраційної дії: підручник*. Київ: Центр учбової літератури, 2017. 607 с.
8. Баженов В. А., Погорелова О. С., Постникова Т. Г., Гончаренко С. Н. Сравнительный анализ способов моделирования контактного взаимодействия в виброударных системах // *Проблемы прочности*. 2009, № 4. С. 69-77.
9. Гольдсмит В. *Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел*. Москва: Стройиздат, 1965. 448 с.
10. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. *Мультифизическое моделирование в электротехнике*. Монография. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
11. Clarence W. de Silva. *Vibration and Shock Handbook*. CRC Press, 2005. 1872 p.
12. www.mathworks.com.

#### References (transliterated)

1. Oprea R. A., Mihailescu M., Chirila A. I., Deaconu I. D. Design and efficiency of linear electromagnetic shock absorbers. *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*. Brasov, 2012, pp. 630-634. doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231813.
2. Wang J., Wang W., Atallah K., Howe D. Design of a linear permanent magnet motor for active vehicle suspension. *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, 2009, pp. 585-591. doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075265.
3. Bondar R.P., Golenkov G.M., Lytvun A. Yu., Podoltsev A.D. Modeliuvannya enerhetychnykh kharakterystyk vibratora z liniinym elektrychnym pryvodom [Modelling of power characteristics of the vibrator with a linear electric drive]. *Electromechanichni i energozberigayuchi systemy*. 2013, no 2, pp. 66-74.
4. Yatchev I., Gueorgiev V., Ivanov, R., Hinov K. Simulation of the Dynamic Behaviour of a Permanent Magnet Linear Actuator. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*. 2010. doi: 23.10.2298/FUEE1001037Y.
5. Bondar R.P. Doslidzhennia kharakterystyk mahnoelektrychnoho liniinoho vibratsiinoho dyvuhuna pry roboti na pruzhno-v'iazke navantazhennia [Research of the magnetoelectric linear oscillatory motor characteristics during the work on elastoviscous loading]. *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*. 2019, no 1, pp. 9-16. doi:10.20998/2074-272X.2019.1.02.
6. Bondar R. P., Podoltsev A. D. Kompleksna model z chastotnozaleznyymi parametramy dlia rozrakhunku robochykh kharakterystyk mahnoelektrychnoho vibratora [Complex model with frequency dependent parameters for electrodynamic shaker characteristics]. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017, no 1, pp. 44-51. doi: 10.15407/techned2017.01.044.
7. Bulhakov V. M., Chernysh O. M., Berezovyi M. H., Yaremenko V. V. Proektuvannya mashyn vibratsiinoi dii: pidruchnyk [Design of machines of vibration action]. Kyiv, Tsentr uchbovoi literatury, 2017. 607 p.
8. Bazhenov V. A., Pogorelova O. S., Postnikova T. G., Goncharenko S. N. Sravnitelnyi analiz sposobov modelirovaniya kontaktnogo vzaimodeystviya v vibroudarnykh sistemah [Comparative analysis of modeling methods for studying contact interaction in vibroimpact systems]. *Problemy prochnosti*. 2009, no 4, pp. 69-77.
9. Goldsmith W. *Udar. Teoriya i fizicheskie svoystva soudaryayemykh tel* [Impact. The theory and physical behavior of colliding solids]. Moscow, Stroyizdat, 1965. 448 p.
10. Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N. *Multifizicheskoe modelirovanie v elektrotehnike* [Multiphysics modeling in electrical engineering]. Kiev, Institut elektrodinamiki NAN Ukrainyi, 2015. 305 p.
11. Clarence W. de Silva. *Vibration and Shock Handbook*. CRC Press, 2005. 1872 p.
12. www.mathworks.com.

Надійшла (received) 15.09.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бондар Роман Петрович (Бондар Роман Петрович, Bondar Roman Petrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електроприводу Київського національного університету будівництва і архітектури; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0198-5548>; e-mail: [rbondar@gmail.com](mailto:rbondar@gmail.com)

**Голєнков Геннадій Михайлович (Голєнков Геннадий Михайлович, Holenkov Hennadii Mykhailovych)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електроприводу Київського національного університету будівництва і архітектури; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9029-9397>