

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОПЕРАЦІЇ ВСТАНОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ЛЮВЕРСІВ У ВИРОБАХ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ НА ПРЕСОВОМУ ОБЛАДНАННІ З ЛІНІЙНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ДВИГУНОМ

З метою розробки методики проектування пресового обладнання з лінійним електромагнітним двигуном в якості приводу, призначеного для встановлення металевої фурнітури, була розроблена математична модель даної технологічної операції. Математична модель технологічного процесу встановлення металевої фурнітури на пресовому обладнанні з лінійним електромагнітним двигуном дозволила об'єднати властивості матеріалу виробу, металевої фурнітури, параметри інструменту, швидкість виконання технологічної операції з однієї сторони та геометричні і енергетичні параметри лінійного електромагнітного двигуна з іншої.

Ключові слова: математична модель; пресове обладнання з лінійним електромагнітним двигуном; технологічна операція встановлення металевої фурнітури.

S. V. CHUMAKOVA

Khmelnytskyi National University

MATHEMATICAL MODEL OF TECHNOLOGICAL OPERATION OF METAL EYE-LET HOLES INSTALLING IN LIGHT INDUSTRY GOODS ON A PRESS EQUIPMENT WITH ELECTROMAGNETIC DRIVE

In order to develop a technique of designing a press equipment with a linear electromagnetic engine (LEME) as a drive used for installing metal accessories a mathematical model of the technological operation has been developed. A mathematical model of technological process of metal accessories installing on the press equipment with LEME allowed to combine the properties of (manufactured) article fabrics, metal accessories, tool parameters, the speed of technological operation on the one hand and geometric and power parameters of a linear electromagnetic engine on the other hand.

Key words: mathematical model; a press equipment with a linear electromagnetic engine; technological operation of metal accessories installing.

Постановка проблеми у загальному вигляді

На сьогоднішній день актуальність використання лінійних електромагнітних двигунів (ЛЕМД) в якості приводу обладнання в різних галузях промисловості не викликає сумніву. На даний час як і в нашій країні, так і країнах далекого і близького зарубіжжя виконано десятки конструкцій пресового обладнання з лінійними електромагнітними двигунами, які відрізняються технічними характеристиками та областями використання. Найбільше застосування вони знайшли в обладнанні, яке використовується в машинобудівній, радіоелектронній, будівельній, ливарній промисловості тощо [1]. Наприклад, в роботі [2] було використано лінійний електромагнітний привід в обладнанні для виконання операцій маркування і клеймування при виробництві деталей та виробів в машинобудуванні, станкобудуванні, автомобілебудуванні тощо. Використання такого обладнання дало змогу суттєво скоротити матеріальні, енергетичні і фінансові витрати, забезпечити необхідну якість маркування та клеймування деталей і виробів. А в роботі [3] запропоновано використати ЛЕМД в якості приводу в пресовому обладнанні, призначеному для виконання технологічних операцій вирубування та перфорування деталей взуття. Це дозволило підвищити ефективність застосування пресового обладнання та поліпшити його техніко-економічні показники.

Успішний досвід використання електромагнітного приводу в пресовому обладнанні, призначеному для вирубування та перфорування деталей взуття свідчить про можливість використання таких типів двигунів в обладнанні, призначеному і для інших операцій легкої промисловості, зокрема і для виконання операції встановлення металевої фурнітури [4]. Використання ЛЕМД в приводі обладнання дозволяє безпосередньо перетворювати електричну енергію в кінетичну енергію прямолінійного руху робочого органу, завдяки чому суттєво спрощується конструкція пристрою, підвищується його надійність та економічність. Відмінною особливістю таких двигунів та систем з їх управлінням є імпульсне живлення від керованого блока живлення та управління, завдяки чому ЛЕМД споживають електроенергію лише під час виконання технологічної операції. В сучасних непростих умовах економії та раціонального використання енергоресурсів це є особливо важливим.

З метою розробки методики проектування пристрою з ЛЕМД в якості приводу, призначеного для встановлення металевої фурнітури, необхідно розробити математичну модель даної технологічної операції. Математична модель технологічного процесу встановлення металевої фурнітури на пристрої з ЛЕМД дозволить зв'язати властивості матеріалу виробу, металевої фурнітури, параметри інструменту, швидкість виконання технологічної операції з однієї сторони та геометричні і енергетичні параметри лінійного електромагнітного двигуна з іншої. Це дасть змогу аналітично дослідити процеси, які відбуваються в зоні встановлення металевої фурнітури та електромагнітному двигуні.

Виклад основного матеріалу досліджень

При побудові математичної моделі технологічного процесу встановлення металевої фурнітури на

пристрої з ЛЕМД було використано методику, наведену в роботі [3]. Згідно з нею, аналітично було описано лише основні процеси, зв'язані з енергоперетворенням в електричній та магнітній ланках двигуна без врахування “внутрішніх” процесів, які відбуваються в них (дія вихрових струмів, намагнічування матеріалу якоря при зануренні його в обмотку) та в механічній системі пристрою [3]. Також не було враховано процеси, які залежать від часу (наприклад, нестационарний теплообмін, зміна активного опору обмотки, відносний рух корпусу машини тощо). Це було пов'язано з тим, що дослідження всіх цих не врахованих процесів не входить до основних завдань проведених нами досліджень.

Для проектування пристрою з ЛЕМД було досліджено процеси, що відбуваються в таких системах: пристрій – пробійник – матеріал – вирубна плита при пробиванні отворів під фурнітуру та пристрій – пуансон – металева фурнітура – матриця при закріпленні фурнітури.

Головною рухомою частиною пристрою з лінійним електромагнітним двигуном є його якор. Тому спочатку було проаналізовано сили, які діють на нього в процесі встановлення металевої фурнітури (на прикладі люверса) в двох системах: пристрій – пробійник – матеріал – вирубна плита та пристрій – пуансон – металевий люверс – матриця (рис. 1).

Всі сили умовно було поділено на дві групи. До першої увійшли сили, які надають рух якорю і зв'язаним з ним виконавчим органам в напрямку зменшення робочого повітряного зазору – електромагнітна сила $F_{ел.}$, яка виникає в двигуні, а також вага якоря і зв'язаних з ним інших рухомих частин Q . В першому випадку виконавчим органом виступає ударник із закріпленням до нього пробійником, який діє на матеріал при виконанні процесу пробивання отворів під металеву фурнітуру. У другому випадку виконавчим органом є ударник із закріпленням до нього пуансоном, який діє на металеву фурнітуру, встановлену у матеріалі та матриці.

До другої групи увійшли сили, які протидіють руху якоря. Їх, в свою чергу, можна розділити на дві категорії: перша – сили корисних опорів, друга – сили шкідливих опорів. До першої категорії було віднесено технологічну силу $F_{техн.}$, яка виникає при виконанні технологічної операції встановлення металевої фурнітури.

До другої категорії було віднесено пружні сили пружини $F_{пр.}$ та силу тертя $F_{тер.}$, яка виникає в направляючих якоря.

Сила інерції $F_{ін.}$ на дільниці розгону якоря до точки x_2 є силою опору, тому має від'ємне значення. З моменту початку виконання технологічної операції сила $F_{ін.}$ є рушійною силою до точки x_3 і тому змінює свій знак на протилежний.

При складанні математичної моделі технологічної операції встановлення металевої фурнітури на пристрої з електромагнітним приводом було прийнято такі припущення:

- лінійний електромагнітний двигун ненасичений;
- струм, який протікає через обмотку, постійний;
- після закінчення виконання технологічної операції ударник із закріпленням технологічним оснащенням повністю витрачає накопичену кінетичну енергію;
- при зануренні пробійника в матеріал (при пробиванні отворів на поліетиленових плитах) технологічне зусилля $F_{проб.}$ зростає пропорційно та досягає максимального значення $F_{проб.макс.}$ при повному пробиванні отвору на глибині $\Delta_2 = \Delta + \Delta_1$;
- при зануренні пуансона у втулку блочка люверса технологічне зусилля $F_{закр.}$ зростає пропорційно та досягає максимального значення $F_{закр.макс.}$ при закріпленні металевого люверса на глибині Δ_3 ;

- при закріпленні металевого люверса у виробі на пристрої з ЛЕМД маса люверса в порівнянні з масою ударника з прикріпленням технологічним оснащенням настільки мала, що нею можна знехтувати.

При складанні математичної моделі технологічного процесу встановлення металевої фурнітури на пристрої з електромагнітним приводом було розглянуто рівняння руху якоря на дільницях $x_1 - x_2$ і $x_2 - x_3$.

На дільниці $x_1 - x_2$ якор починає рух з точки x_1 під дією електромагнітної сили $F_{ел.}$ (рис. 1). До точки x_2 на нього діють, разом із силою $F_{ел.}$, сила пружини $F_{пр.}$, сила тертя $F_{тер.}$, сила інерції $F_{ін.}$ та вага якоря Q . На цій дільниці електроенергія, яка споживається з мережі, частково використовується на виконання роботи подолання сил $F_{пр.}$, $F_{тер.}$ і $F_{ін.}$ та на зміну енергетичного стану електромагнітного двигуна, внаслідок чого відбувається накопичення кінетичної енергії.

Рівняння руху якоря на даній дільниці у відповідності до принципу Даламбера можна описати наступним чином [1]:

$$F_{ін} = F_{ел} - F_{пр} - F_{тер} + Q. \quad (1)$$

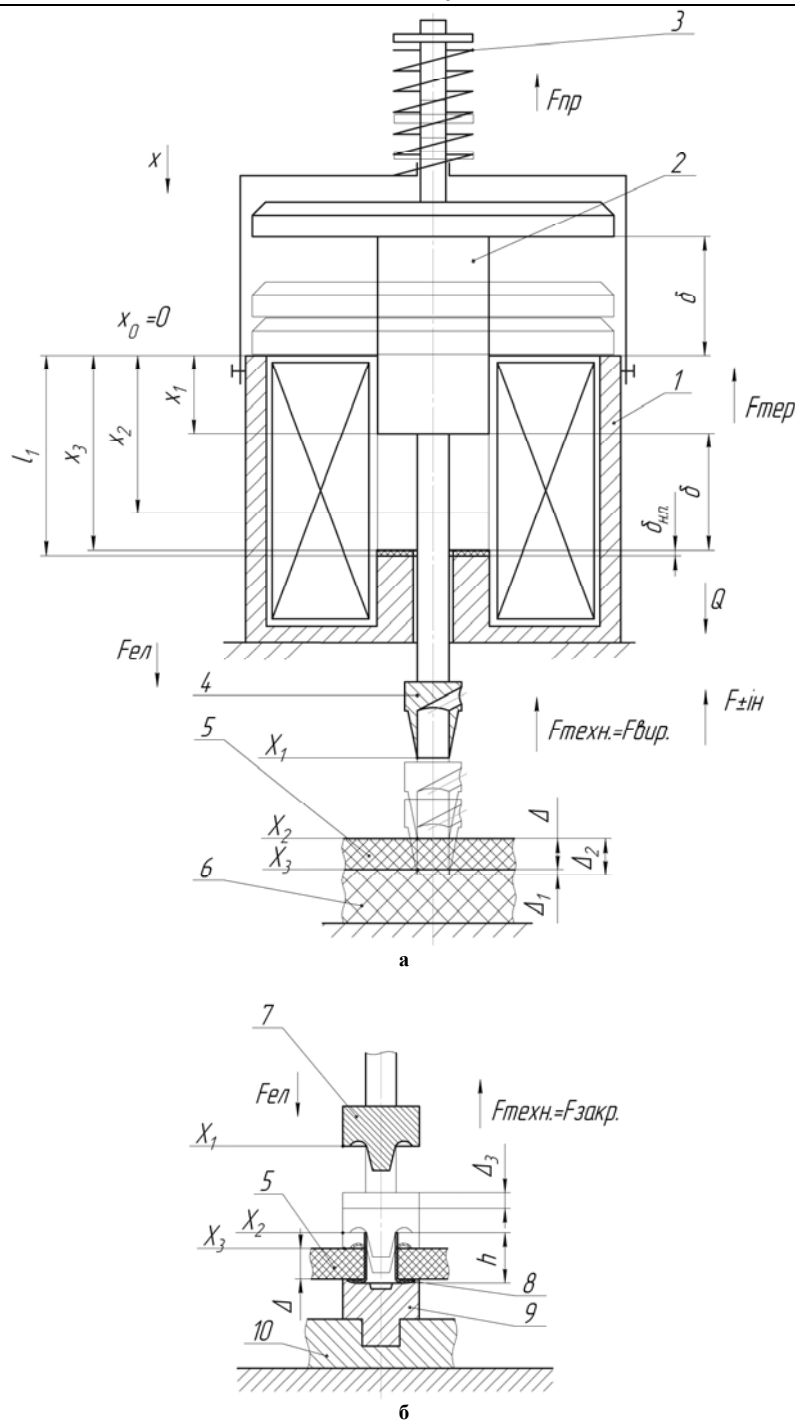


Рис. 1. Схема для визначення сил, що виникають в системах: пристрій – пробійник – матеріал – вирубна плита, при виконанні технологічної операції пробивання отворів у матеріалі (а) та пристрій – пуансон – металева фурнітура – матриця, при виконанні технологічної операції закріплення металевої фурнітури (б):

1 – лінійний електромагнітний двигун; 2 – якорь з прикріпленим ударником; 3 – пружина; 4 – пробійник; 5 – матеріал; 6 – вирубна плита; 7 – пуансон; 8 – металева фурнітура; 9 – матриця; 10 – тримач матриці; δ – довжина робочого повітряного зазору; $\delta_{н.п.}$ – товщина немагнітної амортизаційної прокладки; x – координата миттєвого положення якоря; x_0 – початок координат; x_1 – координата старту якоря; x_2 – координата початку технологічної операції; x_3 – координата кінця технологічної операції; l_1 – конструктивний параметр

З точки x_2 на ділянці $x_2 - x_3$ починається виконання технологічної операції. На цій ділянці на якорь діють ті ж самі сили, що і на ділянці $x_1 - x_2$, однак до сил шкідливих опорів $F_{пр.}$ та $F_{тер.}$ додається сила $F_{техн.}$. Від цього моменту сила інерції $F_{ін.}$ буде направлена в протилежну сторону порівняно з ділянкою $x_1 - x_2$, оскільки якорь починає рухатися з гальмуванням. Електрична енергія, що споживається з мережі, частково використовується на виконання корисної роботи та на подолання сил шкідливих опорів. Рівняння руху якоря для даної ділянки буде мати наступний вигляд:

$$-F_{in} = -F_{техн} + F_{ел} - F_{np} - F_{тер} + Q. \quad (2)$$

У відповідності до закону збереження енергії енергетичний баланс буде мати вигляд [5]:

$$E_k = A_{p.c.} + A_{c.k.o.} + A_{c.m.o.}, \quad (3)$$

де E_k – кінетична енергія машини;

$A_{p.c.}$ – робота рушійних сил;

$A_{c.k.o.}$ – робота сил корисних опорів;

$A_{c.m.o.}$ – робота сил шкідливих опорів.

Сила тяги ЛЕМД з двома робочими зазорами визначається за формулою [6]:

$$F_{ел} = \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{\delta^2}, \quad (4)$$

де I – струм, який протікає через лінійний електромагнітний двигун пристрою;

w – кількість витків обмотки;

S – площа робочого зазору;

μ_0 – магнітна постійна.

Довжина робочого зазору δ зв'язана з координатою x , яка характеризує положення якоря двигуна співвідношенням $\delta = l_1 - x$. Тому отримаємо:

$$F_{ел} = \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2}, \quad (5)$$

Відповідно роботу електромагнітної сили ЛЕМД з двома робочими зазорами можна визначити:

$$A_{ел} = \int F_{ел} dx, \quad (6)$$

Підставивши формулу (5) в формулу (6), було отримано вираз:

$$A_{ел} = \int \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx. \quad (7)$$

Робота сили пружності пружини зворотного ходу якоря визначається за формулою [5]:

$$A_{np} = \int F_{np} dx, \quad (8)$$

$$F_{np} = kx, \quad (9)$$

де k – жорсткість пружини.

Тому:

$$A_{np} = \int kx dx. \quad (10)$$

Робота сили тертя визначається за формулою [5]:

$$A_{тер} = \int F_{тер} dx. \quad (11)$$

Робота сили ваги рухомих частин пристрою з електромагнітним приводом визначається наступним чином [5]:

$$A_{ваг} = \int Q dx \quad (12)$$

$$Q = mg; \quad (13)$$

$$A_{ваг} = \int mg dx, \quad (14)$$

де m – маса рухомих частин пристрою з електромагнітним приводом.

Робота, необхідна при виконанні технологічної операції встановлення металевої фурнітури у виробках легкої промисловості:

$$A_{техн} = \int F_{техн} dx, \quad (15)$$

де $F_{техн.}$ – значення технологічної сили $F_{проб.}$, необхідної для пробивання отвору, в одному випадку, а в іншому – значення технологічної сили $F_{закр.}$ для закріплення металевої фурнітури.

Технологічне зусилля пробивання отвору знаходимо за формулою:

$$F_{проб} = q_{проб} L_{проб} k'_\Delta k'_\beta k'_v, \quad (16)$$

де $F_{проб.}$ – зусилля пробивання отворів у матеріалі виробу;

$q_{проб.}$ – погонне зусилля пробивання отворів;

$L_{проб.}$ – периметр леза пробійника;

k'_Δ – коефіцієнт, який враховує притуплення леза пробійника (1,1÷1,8 при куті загострення пробійника $\alpha = 10^\circ \div 30^\circ$);

k'_β – коефіцієнт, який враховує кут загострення леза пробійника (1,0 ÷ 3,5 при величині затуплення ріжучої кромки пробійника $b = 0,1 \div 0,5$ мм);

k'_γ – коефіцієнт, який враховує швидкість процесу пробивання (1...1,95).

Роботу, яка витрачається на пробивання отвору під металеву фурнітуру, можна розрахувати за формулою:

$$A_{\text{проб}} = \int \frac{q_{\text{проб}} L_{\text{проб}} k'_\Delta k'_\beta k'_\gamma x_{\text{мит}}}{\Delta_2} dx, \quad (17)$$

де $x_{\text{мит}}$ – миттєве значення величини занурення пробійника у матеріал та вирубну плиту при пробиванні отворів.

Технологічне зусилля закріплення $F_{\text{закр}}$ металевих блочок та люверсів можна розрахувати за формулою:

$$F_{\text{закр}} = c' \pi (D_\theta - d) t \sigma_B 2 \cos \alpha, \quad (18)$$

де c' – коефіцієнт, який враховує зміцнення металу і наявність тертя при деформації втулки блочка люверса, $c' = 1,5 \dots 2,0$ [7];

D_θ – діаметр відігнутої частини втулки блочка люверса, мм;

d – внутрішній діаметр фурнітури;

σ_B – границя міцності при розтязі;

α – кут конусності конічної частини пуансона, °.

Роботу закріплення $A_{\text{закр}}$ металевих блочок та люверсів можна розрахувати за формулою:

$$A_{\text{закр}} = \int \frac{c' \pi (D_\theta - d) t \sigma_B 2 \cos \alpha x'_{\text{мит}}}{\Delta_3} dx, \quad (19)$$

де $x'_{\text{мит}}$ – миттєве значення величини занурення пуансона у втулку блочка при закріпленні металевих блочок та люверсів.

Повна робота електромагнітної сили ЛЕМД $A_{\text{ел}}$ на ділянці $x_1 - x_3$ буде визначатися за формулою (рис. 2):

$$A_{\text{ел}} = A_{\text{ел1}} + A_{\text{ел2}}, \quad (20)$$

де $A_{\text{ел1}}$ – робота на ділянці $x_1 - x_2$;

$A_{\text{ел2}}$ – робота на ділянці $x_2 - x_3$.

Визначення роботи $A_{\text{ел1}}$.

У відповідності із формулою (3), рух якоря на ділянці $x_1 - x_2$ можна описати рівнянням:

$$\frac{mV_1^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = A_{\text{ел1}} - A_{\text{нр}} - A_{\text{тер}} + A_{\text{ваги}}, \quad (21)$$

де m – маса якоря та рухомих з ним частин (ударника, пробійника або пуансона);

V_0 – швидкість якоря в момент початку руху;

V_1 – швидкість якоря в момент початку виконання технологічної операції.

Робота, яку виконує ЛЕМД на першій ділянці, визначалася при умові, що початкова швидкість руху якоря $V_0 = 0$. Тоді:

$$A_{\text{ел1}} = A_{\text{нр}} + A_{\text{тер}} - A_{\text{ваги}} + \frac{mV_1^2}{2}. \quad (22)$$

Підставивши (7, 10, 11, 14) в (22), було отримано:

$$\int \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx = \int kx dx + \int F_{\text{тер}} dx - \int mg dx + \frac{mV_1^2}{2}. \quad (23)$$

Роботу електромагнітної сили ЛЕМД на ділянці $x_1 - x_2$ було визначено підстановкою координат початку і кінця цієї ділянки у формулу (23):

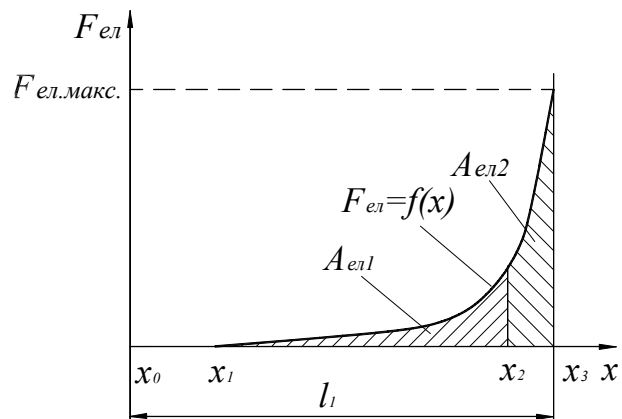


Рис. 2. Схема для визначення роботи електромагнітної сили лінійного електромагнітного двигуна

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx = \int_{x_1}^{x_2} kx dx + \int_{x_1}^{x_2} F_{мер} dx - \int_{x_1}^{x_2} mg dx + \frac{mV_1^2}{2}. \quad (24)$$

Визначення роботи $A_{ел2}$ також проводилося у відповідності з формулою (3), тому рух якоря на ділянці $x_2 - x_3$ можна описати виразом:

$$\frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} = A_{ел2} - A_{np} - A_{мер} + A_{ваги} - A_{мехн} \quad (25)$$

Оскільки було зроблено припущення про те, що режим роботи пристрою з електромагнітним приводом підібраний так, що в кінці виконання технологічної операції якор ЛЕМД повністю витрачає накопичену на першій ділянці кінетичну енергію, то робота, яку повинен виконати ЛЕМД на другій ділянці, була визначена при умові, що кінцева швидкість руху якоря $V_2 = 0$.

Тоді:

$$A_{ел2} = A_{np} + A_{мер} - A_{ваги} + A_{мехн} - \frac{mV_1^2}{2}, \quad (26)$$

Підставивши (7, 10, 11, 14, 15) в (26), було отримано:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx = \int_{x_1}^{x_2} kx dx + \int_{x_1}^{x_2} F_{мер} dx - \int_{x_1}^{x_2} mg dx + \int_{x_1}^{x_2} F_{мехн} dx - \frac{mV_1^2}{2}. \quad (27)$$

Роботу електромагнітної сили ЛЕМД на ділянці $x_2 - x_3$ було визначено, підставивши у формулу (23) координати початку і кінця даної ділянки:

$$\int_{x_2}^{x_3} \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx = \int_{x_2}^{x_3} kx dx + \int_{x_2}^{x_3} F_{мер} dx - \int_{x_2}^{x_3} mg dx + \int_{x_2}^{x_3} F_{мехн} dx - \frac{mV_1^2}{2}. \quad (28)$$

Роботу електромагнітної сили ЛЕМД на даних ділянках можна представити системою рівнянь:

$$\begin{cases} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx = \int_{x_1}^{x_2} kx dx + \int_{x_1}^{x_2} F_{мер} dx - \int_{x_1}^{x_2} mg dx + \frac{mV_1^2}{2} \\ \int_{x_2}^{x_3} \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx = \int_{x_2}^{x_3} kx dx + \int_{x_2}^{x_3} F_{мер} dx - \int_{x_2}^{x_3} mg dx + \int_{x_2}^{x_3} F_{мехн} dx - \frac{mV_1^2}{2} \end{cases} \quad (29)$$

Система рівнянь (29) є математичною моделлю технологічного процесу встановлення металевої фурнітури на пристрої з ЛЕМД.

Якщо підставити в дану систему рівнянь замість технологічної роботи встановлення металевої фурнітури роботу $A_{проб.}$, необхідну для пробивання отвору під металеву фурнітуру (формула 17), то отримаємо математичну модель, яка зв'язує властивості матеріалу, параметри інструменту, швидкість пробивання з однієї сторони та геометричні і енергетичні параметри електромагнітного двигуна з іншої. Тоді система (29) матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx = \int_{x_1}^{x_2} kx dx + \int_{x_1}^{x_2} F_{мер} dx - \int_{x_1}^{x_2} mg dx + \frac{mV_1^2}{2} \\ \int_{x_2}^{x_3} \frac{(Iw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx = \int_{x_2}^{x_3} kx dx + \int_{x_2}^{x_3} F_{мер} dx - \int_{x_2}^{x_3} mg dx + \int_{x_2}^{x_3} \frac{q_{проб} L_{проб} k'_\Delta k'_\beta k'_v x}{\Delta_2} dx - \frac{mV_1^2}{2} \end{cases} \quad (30)$$

Проінтегрувавши ліву і праву частини системи рівнянь (30) та зробивши необхідні перетворення, було отримано систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{1}{4} I^2 w^2 S\mu_0 \left(\frac{1}{l_1 - x_2} - \frac{1}{l_1 - x_1} \right) = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2) + F_{мер} (x_2 - x_1) - mg (x_2 - x_1) + \frac{mV_1^2}{2} \\ \frac{1}{4} I^2 w^2 S\mu_0 \left(\frac{1}{l_1 - x_3} - \frac{1}{l_1 - x_2} \right) = \frac{1}{2} k (x_3^2 - x_2^2) + F_{мер} (x_3 - x_2) - mg (x_3 - x_2) + \frac{1}{2} \frac{q_{проб} L_{проб} k'_\Delta k'_\beta k'_v (x_3^2 - x_2^2)}{\Delta_2} - \frac{mV_1^2}{2} \end{cases} \quad (31)$$

Якщо підставити в систему рівнянь (29) замість технологічної роботи встановлення металевої фурнітури роботу $A_{закр.}$, необхідну для закріплення металевої фурнітури у виробках (формула 19), то одержимо математичну модель, яка зв'язує геометричні і енергетичні параметри електромагнітного двигуна з параметрами інструментів, металевої фурнітури та матеріалу виробу. В такому випадку вищеназвана система рівнянь прийме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(lw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx &= \int_{x_1}^{x_2} kx dx + \int_{x_1}^{x_2} F_{мер} dx - \int_{x_1}^{x_2} mg dx + \frac{mV_1^2}{2} \\ \int_{x_2}^{x_3} \frac{(lw)^2}{4} \frac{S\mu_0}{(l_1 - x)^2} dx &= \int_{x_2}^{x_3} kx dx + \int_{x_2}^{x_3} F_{мер} dx - \int_{x_2}^{x_3} mg dx + \int_{x_2}^{x_3} \frac{c' \pi (D_\theta - d) \tau \sigma_B 2 \cos \alpha}{\Delta_3} x dx - \frac{mV_1^2}{2} \end{aligned} \right. \quad (32)$$

Проінтегрувавши ліву і праву частини системи рівнянь (32) та зробивши необхідні перетворення, було отримано систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{4} l^2 w^2 S\mu_0 \left(\frac{1}{l_1 - x_2} - \frac{1}{l_1 - x_1} \right) &= \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2) + F_{мер} (x_2 - x_1) - mg (x_2 - x_1) + \frac{mV_1^2}{2} \\ \frac{1}{4} l^2 w^2 S\mu_0 \left(\frac{1}{l_1 - x_3} - \frac{1}{l_1 - x_2} \right) &= \frac{1}{2} k (x_3^2 - x_2^2) + F_{мер} (x_3 - x_2) - mg (x_3 - x_2) + \frac{c' \pi (D_\theta - d) \tau \sigma_B \cos \alpha}{\Delta_3} (x_3^2 - x_2^2) - \frac{mV_1^2}{2} \end{aligned} \right. \quad (33)$$

Системи рівнянь (31) та (33) розв'язуються при відомих величинах факторів, які визначають конструктивні та електричні параметри пристрою з лінійним електромагнітним двигуном, технологічні параметри робочих інструментів, матеріалу виробу і матеріалу фурнітури.

Висновки

Розроблена математична модель технологічного процесу встановлення металевої фурнітури на пристрої з ЛЕМД дозволила аналітично дослідити та проаналізувати процеси, які відбуваються в зоні встановлення металевої фурнітури та електромагнітному двигуні. Дана математична модель може бути використана при проектуванні пристрою з ЛЕМД, призначеного для встановлення металевої фурнітури.

Література

1. Ряшенцев Н.П. Электромагнитные прессы / Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. – Новосибирск : Наука, СО, 1989. – 216 с.
2. Егоров А.А. Импульсный линейный электромагнитный привод для операций маркирования и клеймения деталей и изделий : дис. ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Егоров Андрей Александрович. – Саратов, 2006. – 179 с.
3. Поліщук О.С. Підвищення ефективності застосування пресового обладнання в легкій промисловості: дис. ... канд. технічних наук : 05.05.10 / Поліщук Олег Степанович. – Хмельницький, 2001. – 143 с.
4. Поліщук О.С. Перспективи застосування імпульсного лінійного електромагнітного приводу в пресовому обладнанні для вставки металевої фурнітури при виготовленні виробів легкої промисловості / О.С. Поліщук, Д.В. Прибега, С.В. Чумакова // Вісник ХНУ. – 2009. – № 5. – С. 11–14.
5. Лебедев В.С. Технологические процессы машин и аппаратов в производствах бытового обслуживания / Лебедев В.С. – М. : Легпромбытиздат, 1991. – 336 с.
6. Ефимов И. Г. Линейный электромагнитный привод / Ефимов И.Г., Соловьев А.В., Викторов О.А. – Л. : Издательство Ленинградского университета, 1990. – 212 с.
7. Проектирование и расчет машин обувных и швейных производств : учеб. пособие для вузов по специальности “Машины и аппараты легкой промышленности, / [А.И. Комиссаров, В.В. Жуков, В.М. Никифоров, В.В. Сторожев] ; под ред. А. И. Комиссарова. – М. : Машиностроение, 1978. – 431 с.

References

1. Riashentsev N. P. Elektromagnitnye pressy / Riashentsev N. P., Uharov H. H., Lvytsun A. V. - Novosybyrsk: Nauka, SO, 1989. – 216 p.
2. Ehorov A. A. Impulsnyi lyneinyi elektromagnitnyi pryvod dlia operatsii markirovaniya i kleimeniya detalei i izdelyi: dys. ... kandydata tekhnicheskikh nauk: 05.09.03 / Ehorov Andrei Aleksandrovych. – Saratov, 2006. – 179 p.
3. Polishchuk O.S. Pidvyshchenia efektyvnosti zastosuvania presovoho obladnania v lehkii promyslovosti: dys. ... kandydata tekhnicheskikh nauk: 05.05.10 / Polishchuk Oleh Stepanovych. – Khmelnytskyi, 2001. – 143 p.
4. Polishchuk O.S. Perspektyvy zastosuvania impulsnoho liniinoho elektromagnitnoho pryvodu v presovomu obladnani dlia vstavky metalevoi furnitury pry vyhotovleni vyrobiv lehkoi promyslovosti / O.S. Polishchuk, D.V. Prybeha, S.V. Chumakova // Visnyk KhNU. Technical science. Khmelnytskyi. 2009. Issue №5. pp. 11 – 14.
5. Lebedev V. S. Tekhnolohicheskyye protsessy mashyn i apparatov v proyzvodstvakh butovoho obsluzhyvaniya / Lebedev V. S. - M.: Lehprombutyzdat, 1991. – 336 p.
6. Efymov Y. H. Lyneinyi elektromagnitnyi pryvod / Efymov Y. H., Solovev A. V., Vyktorov O. A. - L.: Yzdatelstvo Lenynhradskoho univversyteta, 1990. – 212 p.
7. Proektyrovanye i raschet mashyn obuvnyh i shveynykh proizvodstv: ucheb. posobie dlia vuzov po spetsyalnosty “Mashyny i apparaty lehkoi promyshlenosti, / [A. Y. Komisarov, V. V. Zhukov, V. M. Nikiforov, V. V. Storozhev]; pod red. A. Y. Komisarova. – Moskva: Mashynostroenye, 1978. – 431 p.

Рецензія/Peer review : 3.4.2013 р. Надрукована/Printed :20.4.2013 р.

Рецензент: д.т.н., проф. каф. основ інженерної механіки
Хмельницького національного університету Шалапко Ю.І.