

УДК 621.87

М.В. ЯКИМЧУК, канд. техн. наук

Національний університет харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІКИ ЛІНІЙНИХ ДВИГУНІВ В МОДУЛЯХ ПЕРЕМІЩЕННЯ УПАКОВОК

В статті розглядається можливість використання лінійних асинхронних двигунів для виконання операцій лінійних переміщень упаковок з використанням різних конструкцій захоплюючих пристроїв. Представлені математичні моделі для визначення основних кінематичних та динамічних параметрів таких конструкцій. Отримані результати можна використовувати для конструювання модулів переміщення з лінійними двигунами.

Ключові слова: лінійний двигун, вакуумний, важільний, комбінований захоплюючий пристрій.

Для реалізації зворотно-поступального руху за попередньо заданими законами та можливістю зупинки в проміжних точках ходу використовуються пневматичний привод та електричний привод з різними видами передач. Останнім часом в якості електроприводу, все частіше використовується лінійний двигун. 1. Конструкція лінійних двигунів відома давно. Але з відкриттям нових технологій та матеріалів використання лінійних двигунів стало знову актуальним питанням. Порівняльну характеристику різних типів приводів включаючи систему їх керування наведено в таблиці.

Лінійний двигун є електричною машиною, принцип роботи якої заснований на використанні енергії бігучого магнітного поля. Якщо обмотки статора такого двигуна підключити до мережі змінного струму, то утворюється магнітне поле, вісь якого буде переміщатися вздовж повітряного зазору зі швидкістю, пропорційною частоті напруги живлення і довжині полюсного

© М. В. Якимчук, 2011

Характеристика різних типів приводів

Технологія приводу	Стандартна пневматика	Приводи з ременем	Гвинт-гайка ковзання	Гвинт-гайка кочення	Лінійний двигун
Навантаження	++	+++	++	+++	++
Хід	+++	+++	++	++	+++
Швидкість	++	+++	+	++	+++
Прискорення	+	+++	+	++	+++
Точність зупинки	++	++	++	+++	+++
Шум	+	++	++	+++	+++
Жорсткість	++	++	+++	+++	+++
Ціна	+++	++	++	+++	++
Гнучкість переналагодження	++	+++	+++	+++	+++

поділу. Дане магнітне поле, перетинає провідники обмотки ротора і індукує в них ЕРС, під дією якої по обмотці починає протікати струм. Взаємодія струму ротора з магнітним полем статора призведе до появи сили, що діє, за відомим правилом Ленца, в напрямку переміщення магнітного поля. Ротор під дією такої сили почне рухатися Рис.1.

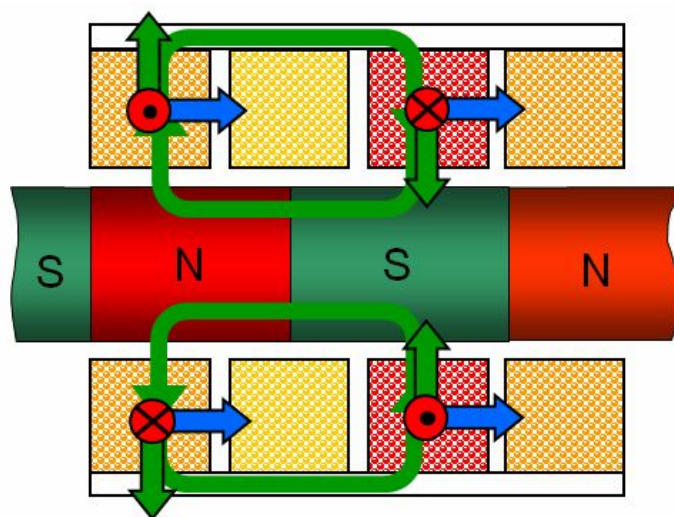


Рис.1. Виникнення рушійної сили в лінійному двигуні за рахунок взаємодії струмів з магнітним полем

Лінійні двигуни в пакувальному обладнанні можуть забезпечити насамперед переміщення робочих органів та упаковок в горизонтальній та вертикальній площинах.

Розглянемо роботу модулів з лінійним приводом у вертикальній площині. Модуль комплектується захоплюючим пристроєм, який утримує упаковку. Вид захоплюючого пристрою залежить від розмірів упаковок, її матеріалу, ваги, виду наповнювача і т. д. Способи кріплення захоплюючого пристрою до модулю переміщення суттєво впливають на динаміку їх роботи. Найбільш вживаними захоплюючими пристроями є вакуумні, важільні, комбіновані. Розрахункові схеми модуля лінійного переміщення з кожним видом захоплюючого пристрою показано на рис. 2.

Першою було розглянуто схему лінійного модуля з вакуумним захоплюючим пристроєм. Її представлено у вигляді трьох масової моделі (Рис.2,а), яка складається із маси механізму m_M , маси вантажу m_T і маси частин приводу m_P та двох пружних зв'язків, одним з яких – жорсткість конструкції механізму k_M , інший – жорсткість підвісу механізму захоплення k_T .

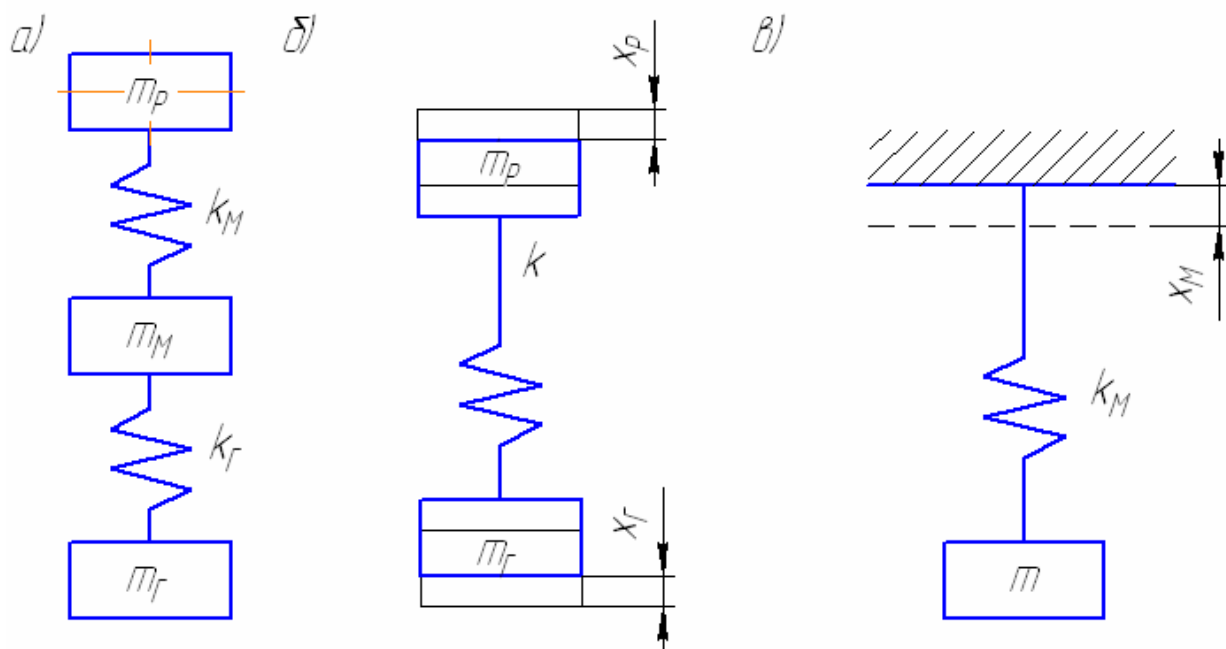
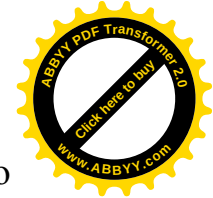
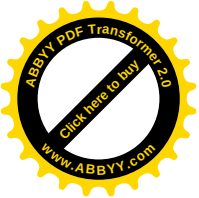


Рис.2. Схеми лінійного модуля з а) вакуумним захоплюючим пристроєм; б) важільним захоплюючим пристроєм; в) комбінованим захоплюючим пристроєм



Другою поширеною схемою є використання важільного захоплюючого пристрою. Враховуючи жорсткість конструкції таких пристроїв та відсутність гнучких елементів в системі з'єднання, розрахункову схему було зведено до дво масової моделі (Рис.2,б), замінивши жорсткість пристрою захоплення k_{Γ} і механізму k_M приведеною жорсткістю.

$$k = k_M k_{\Gamma} / (k_M + k_{\Gamma}) \quad (1)$$

Під час процесу переміщення мас m_P і m_{Γ} кінетична і потенціальна енергії визначаються:

$$E_K = m_P \dot{x}_P^2 / 2 + m_{\Gamma} \dot{x}_{\Gamma}^2 / 2; E_{\Pi} = k(x_P - x_{\Gamma})^2 / 2 \quad (2)$$

Рушійною силою під час піднімання для маси m_P , що діє в напрямку сили інерції вантажу є вага вантажу G_{Γ} та надлишкова сила приводу $F_{\text{над}}$. Для даної схеми надлишкова сила $F_{\text{над}}$ можна вважати постійною величиною:

$$F_{\text{над}} = (\psi - 1)G_{\Gamma} = \varphi_{\Pi} G_{\Gamma} \quad (3)$$

де φ_{Π} – коефіцієнт пропорційності; ψ - перевантажувальна здатність приводу.

Рівняння руху для другої системи має вигляд:

$$m_P \ddot{x}_P + k(x_P - x_{\Gamma}) = G_{\Gamma} + F_{\text{над}}; \quad (5)$$

$$m_{\Gamma} \ddot{x}_{\Gamma} - k(x_P - x_{\Gamma}) = -G_{\Gamma} \quad (6)$$

Ввівши позначення:

$$x = (x_P - x_{\Gamma}), m = m_P m_{\Gamma} / (m_P + m_{\Gamma}), f_K^2 = mk \quad (7)$$

отримаємо рівняння для визначення координати вантажу

$$x = -\frac{F_{над}}{kmm_P} \cos f_K t + \frac{G_\Gamma}{k} + \frac{F_{над}}{kmm_P} = \frac{G_\Gamma}{k} + \frac{F_{над}}{kmm_P} (1 - \cos f_K t) \quad (8)$$

Загальну силу дії вантажу на піднімальний пристрій знаходимо як

$$F_\Sigma = xk = G_\Gamma + F_{над} \frac{m_\Gamma}{m_P + m_\Gamma} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{k(m_P + m_\Gamma)}{m_P m_\Gamma}} t \right) \quad (9)$$

Величина F_Σ є змінною і залежить від часу t . Максимальне значення зусилля при $\cos f_K t = -1$ має вигляд

$$F_\Sigma = G_\Gamma + 2F_{над} \frac{m_\Gamma}{m_P + m_\Gamma} = G_\Gamma + 2\varphi_\Pi \frac{m_\Gamma}{m_P + m_\Gamma} \quad (10)$$

а коефіцієнт динамічності

$$K_{дин} = \frac{F_\Sigma}{G_\Gamma} = 1 + 2\varphi_\Pi \frac{m_\Gamma}{m_P + m_\Gamma} \quad (11)$$

В третій схемі розглядався підйом упаковок за допомогою комбінованих захоплюючих пристроїв. В даній схемі жорсткістю підвісу було знехтувано, так, як піддатливість металоконструкції комбінованої захоплюючої головки значно вища, а маси m_M та m_Γ розглядали як одну масу m . Така конструкція зводиться до одно масової моделі (Рис.2, в).

Під час переміщення маси m_M з жорсткістю k_M кінетична і потенціальна енергія розраховуються за рівнянням:

$$E_K = m_M \dot{x}_M^2 / 2; E_\Pi = k_M x_M^2 / 2 \quad (12)$$

Рівняння руху для даного етапу має вигляд:

$$m_M \ddot{x}_M + k_M x_M = F$$

(13)

Координата переміщення вантажу визначається як

$$x_M = y_{CT} + v \sin f_K t / f_K$$

(14)

де y_{CT} - прогин конструкції від статичного навантаження; v - швидкість підйому вантажу; f_K - колова частота вільних коливань ($f_K = \sqrt{k_M / (m_M + m_\Gamma)}$); t - поточний час.

Швидкість піднімання вантажу для третьої схеми визначається

$$\dot{x}_M = v \cos f_K t; \ddot{x}_M = -v f_K \sin f_K t$$

(15)

Динамічне навантаження, що діє на привод з боку вантажу під час підіймання має вигляд,

$$F_{дин} = m_\Gamma \ddot{x}_M = -(G_\Gamma / g) v f_K \sin f_K t$$

(16)

Максимальне значення навантаження буде за умови, що $\sin f_K t = -1$ і визначається з рівняння

$$F_{дин} = \frac{G_\Gamma}{g} v f_K = \frac{G_\Gamma}{g} v \sqrt{\frac{k_M}{m_M + m_\Gamma}}$$

(17)

Повне навантаження, що діє на пристрій піднімання для третьої схеми,

$$F_\Sigma = G_\Gamma + F_{над} = G_\Gamma \left(1 + \frac{v}{g} \sqrt{\frac{k_M}{m_M + m_\Gamma}} \right)$$

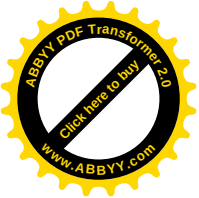
(18)

Коефіцієнт динамічності знаходимо з рівняння

$$K_{дин} = \frac{G_\Gamma + F_{над}}{G_\Gamma} = \left(1 + \frac{v}{g} \sqrt{\frac{k_M}{m_M + m_\Gamma}} \right)$$

(19)

Враховуючи, що



$$k_M = G_\Gamma / y_{CT} = m_\Gamma g / y_{CT} \quad (20)$$

отримаємо значення $K_{дин}$ у вигляді

$$K_{дин} = 1 + \nu \sqrt{\frac{m_\Gamma}{g y_{CT} (m_M + m_\Gamma)}}. \quad (21)$$

Розглянемо процеси, які мають місце в роботі лінійного двигуна під час піднімання вантажу. Такі процеси описуються системою диференціальних рівнянь електричної і механічної рівноваги, а також рівнянням перетворень електромагнітної енергії в механічну.

Спільність фізичних явищ перехідних процесів дозволяє при виводі рівняння лінійного асинхронного двигуна взяти за основу відому систему диференціальних рівнянь двигуна обертового руху. У лінійній асинхронній машині електромеханічне перетворення енергії відбувається на ділянці, де вторинний елемент має електромагнітний зв'язок зі статором. Розглянемо вплив зміни глибини занурення вторинного елемента на параметри активної частини машини.

З умови рівності потужності при обертовому і поступальному русі можемо записати рівняння:

$$M \cdot \frac{1}{P} 2\pi f (1 - S_B) = F \cdot 2\tau \cdot f (1 - S_\Pi) \quad (22)$$

де S_B і S_Π – ковзання для обертового і поступального руху, відповідно

$$S_B = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}; S_\Pi = \frac{v_0 - v}{v_0}; \quad (23)$$

З урахуванням рівнянь 22 та 23 запишемо математичну модель роботи лінійного асинхронного двигуна в системі координат u, v , що рухається в просторі з довільною швидкістю v_k (24):

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{u1}}{dt} &= u_{u1} - \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \psi_{u1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s K_r \psi_{u2} + v_k \psi_{v1}; \\ \frac{d\psi_{v1}}{dt} &= u_{v1} - \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s \psi_{v1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_s K_r \psi_{v2} + v_k \psi_{u1}; \\ \frac{d\psi_{u2}}{dt} &= -\frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r \psi_{u2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_s \psi_{u1} + \frac{\pi}{\tau} (v_k - v) \psi_{v2}; \\ \frac{d\psi_{v2}}{dt} &= -\frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r \psi_{v2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \alpha'_r K_s \psi_{v1} + \frac{\pi}{\tau} (v_k - v) \psi_{u2}; \\ F &= \frac{3}{2} \frac{\pi^2 v_0 K_r}{\tau^2 \sigma X_s} K (\psi_{u2} \psi_{v1} - \psi_{u1} \psi_{v2}); \\ \frac{dv}{dt} &= (F - F_c) / m; \\ v &= dx / dt. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Коефіцієнти системи рівнянь для пуску і гальмування визначаються параметрами двигуна та джерелом живлення в даному режимі роботи.

Параметри u_{u1} , u_{v1} виражаються для ЛАД наступними рівняннями (25):

$$\left. \begin{aligned} u_{u1} &= U_m \cos \left[(v_0 - v_K) \frac{\pi}{\tau} t + \gamma \right] \\ u_{v1} &= U_m \sin \left[(v_0 - v_K) \frac{\pi}{\tau} t + \gamma \right] \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

де U_m – амплітуда фазної напруги; γ – фаза включення напруги.

Аналітичне рішення системи диференціальних рівнянь з метою знаходження залежності сили, швидкості, переміщення вторинного елемента, потокозчеплення та електричних струмів як функції часу можливо за умови використання обчислювальної техніки та математичних методів для системи не лінійних рівнянь.

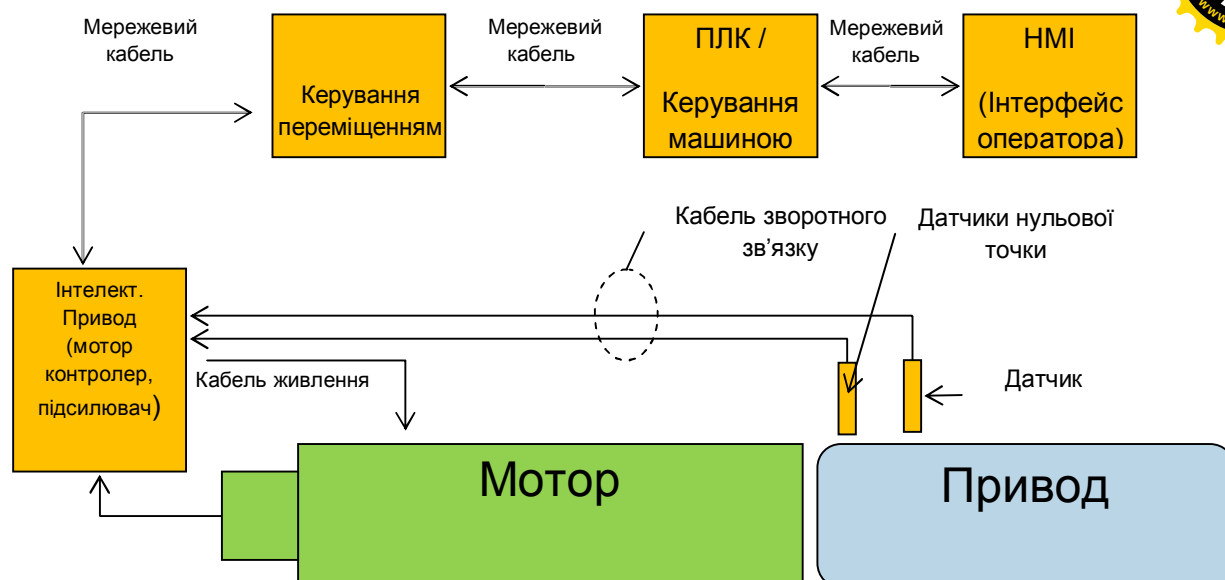


Рис.3. Структурна схема лабораторної установки

Для дослідження роботи лінійного двигуна була розроблена та виготовлена експериментальна установка. Схема установки показана на рис.3. Досліди склалися з кількох етапів в ході яких змінювалась маса вантажу, швидкість і прискорення. Результати експериментальних досліджень були отримані у вигляді графіків.

За даними досліджень був проведений багатофакторний експеримент та отримані критеріальні рівняння для визначення часу в процесі піднімання і опускання вантажу.

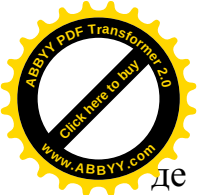
Математико-статична модель, яка адекватна процесу має вигляд

$$t = 0,643 - 0,0427a - 0,009975V - 0,094m + 0,00085aV - 0,0022am - 0,0105Vm + 0,0052aVm. \quad (26)$$

Аналіз експериментальних результатів проводився за розробленою методикою, яка складалась з трьох етапів. На першому етапі аналізу, графік закону переміщення розкладався в ряд Фур'є.

На другому етапі дослідження застосовувалось спеціальне програмне забезпечення, яке допомагало математично записувати рівняння кожної гармоніки у вигляді

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cos(\omega t + \varphi) + R \quad (27)$$



де A – синусоїдальна складова, B – косинусоїдальна складова, R – постійна складова, φ – фаза, t – час переміщення, ω – кутова частота, яка визначається

На третьому етапі досліджень графічно накладались всі графіки гармонік в одних системах координат по яким проводився подальший аналіз.

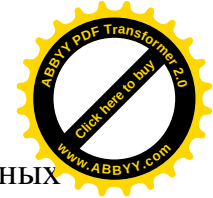
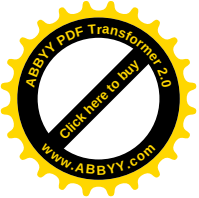
Висновок: На основі аналізу гармонік переміщення можна припустити, що початок виходу системи з номінального режиму роботи починається з моменту, коли амплітуда будь-якої гармоніки стає рівною або більшою за амплітуду першої гармоніки.

Після аналізу гармонік прискорення, можна стверджувати, що прискорення є складовою характеристикою інерційних і рушійних сил. Система працює безвідмовно у випадку коли амплітуда першої гармоніки більша за амплітуду всіх інших, тобто у випадку коли рушійна сила більша сили інерції. Як тільки амплітуда будь-якої з інших гармонік стає більшою за першу, тобто відбувається збільшення інерційної складової, система керування починає реагувати на таке збурення. Відбувається спроба регулятора компенсувати дію сили інерції, що приводить до появи додаткових автоколивань. Про це свідчить збільшення величини амплітуд всіх гармонік. Накладання зовнішніх коливань із внутрішніми автоколиваннями сумуються і стають не затухаючими. В деяких випадках вони наближуються до режиму резонансу, що приводить до аварійної зупинки системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Соколова Е. М., Мощинский Ю. А., Цилиндрические линейные асинхронные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 1998. -26 с.
2. Сарапулов Ф. Н., Бегалов В. А., Иваницкий С. В. и др. Свердлов., Расчет статических характеристик линейных асинхронных машин: Учебное пособие. Екатеринбург: УПИ, 1992. 100 с.

В статье рассматривается возможность использование линейных асинхронных двигателей для операций линейных перемещений упаковок с помощью различных конструкций захватывающих устройств.



Представлена математическая модель для определения основных кинематических и динамических параметров таких конструкций. Полученные результаты могут быть использованы для разработки модулей перемещения с линейным двигателем.

Ключевые слова: линейный двигатель, вакуумные, рычажные, комбинированные захватывающее устройства.

M. YAKIMCHUK, doctor of sciences

National University of food technologies

INFLUENCE OF LINEAR MOTORS DYNAMICS IN MODULES OF MOVING PACKAGES

The article below shows the possibility of using linear asynchronous engines for linear packaging of various devices. In the article combined the most common designs of exciting devices: vacuum, transmission. There is a mathematical model for determining of basic kinematic and dynamic parameters of such constructions in the article. Equivalence of theoretical results to real verified by the experimental aggregate for the research of linear motor. Optimum modes of operation of linear actuators in lifting mechanisms are depends on the kind of exciting device and method of loading. In the article methods for the analysis of experimental plots of acceleration are developed. These methods are also applied to the harmonic graphs. Presented results can be used to develop modules of movement with linear motors.

Keywords: linear motor, vacuum, lever, combined device.

Одержана редколлегією _____