

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЛІНІЙНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Голенков Г.М., к.т.н., доц.

Київський національний університет будівництва і архітектури

Україна, 03037, Київ, пр. Повітрофлотський 31, КНУБА, кафедра "Електротехніки та електроприводу"  
тел. (044) 241-55-65

*Розроблено методику розрахунку графоаналітичним методом часу перехідного процесу запуску лінійного асинхронного електропривода електромагнітного молоту, обґрунтовано місце розташування датчиків контролю переміщення бігуна (ударника) і дано передумови для розробки алгоритму керування роботою молоту для забивання паль.*

*Разработана методика расчёта графоаналитическим методом времени переходного процесса запуска линейного асинхронного электропривода электромагнитного молота, обосновано место расположения датчиков контроля перемещения бегуна (ударника) и даны предпосылки для разработки алгоритма управления работой молота для забивки свай.*

Перспективними із точки зору покращення техніко-економічних показників машин ударної дії є приводи виконавчих механізмів на основі лінійних асинхронних електродвигунів (ЛАД) [1].

В роботі [2] та ін. проаналізовані електромагнітні процеси, що протікають у ЛАД, та систематизовані чисельні методи розрахунку тягових характеристик при різних режимах роботи з урахуванням "крайового ефекту".

Однак, були недостатньо змодельовані електромагнітні процеси, пов'язані із вмиканням та вимиканням приводу ЛАД при роботі електромагнітного молоту, наприклад, молоту для забивання паль (рис.1). Не була змодельована оптимальна оцінка енергетичних параметрів, пов'язаних із перехідними електромагнітними процесами, які характерні при роботі механізмів ударної дії, що ускладнює автоматизацію процесу роботи молоту.

Електромагнітний молот працює таким чином. Через тиристорну станцію управління на обмотку індуктора подається напруга змінного струму, і виникає магнітне поле, що біжить, яке при взаємодії з індукційним струмом вторинного контуру бігуна викликає тягове зусилля, що впливає на дію бігуна ударника.

Датчики D1-D4 дозволяють за заданою програмою вмикати та вимикати ЛАД, фіксуючи при цьому місце розташування бігуна та використання його у якості ударника, який міг би розвинути максимальну енергію удару. З метою визначення місця оптимального розташування датчиків на шляху руху бігуна необхідно провести дослідження, пов'язані з перехідними процесами роботи приводу ЛАД електромагнітного молота.

При розробці автоматизованого електроприводу молоту з ЛАД потрібно для управління роботою механізму для занурення паль розрахувати тягову характеристику ЛАД, визначити перехідні процеси роботи молоту з метою знаходження місця розташування датчиків контролю положення бігуна молоту, що дозволить автоматизувати молот.

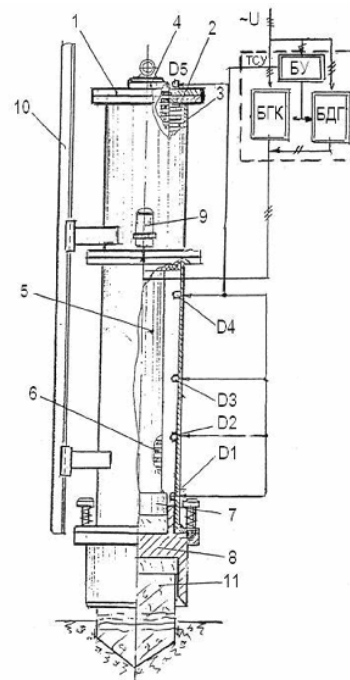


Рис.1. Молот електромагнітний для занурення паль:

1-корпус молоту; 2-статор ЛАД; 3-обмотка статора ЛАД; 4-бігун (ударник); 5-сердечник бігуна; 6-обмотка (кільце) бігуна; 7-п'ята бігуна (ударника); 8-наголовник (ковадло); 9-кабельний ввід; 10-направляюча; 11-паль; D1-D5 – датчики положення; ТСУ – тиристорна станція управління; БУ – блок управління; БТК – безконтактний тиристорний комутатор; БДГ – блок динамічного гальмування

Для розрахунку процесів роботи молоту застосовано графоаналітичний метод.

Складається диференційне рівняння руху бігуна ЛАД молоту, наприклад, для забивання паль, тоді:

$$F_{\dot{a}i}(s) \pm F_c = m \frac{dV}{dt}, \quad (1)$$

де  $F_{\dot{a}i}(s)$  - електромагнітне тягове зусилля ЛАД, Н;  
 $F_c = F_{\dot{a}i}(s) / 1,3$  - сила опору (номінальне зусилля), Н;  
 $m = F_{c(H)} / g$  - маса бігуна, кг;  $g$  - прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ .

Електромагнітне тягове зусилля:

$$F_{\hat{a}i} = \frac{Nm_1 U_1^2 R_2' / s}{V_1 ((R_1 + R_2' / s + \xi R_{\mu})^2 + (X_1 + X_2' + \xi X_{\mu})^2)} + \frac{N \xi m_1 U_1^2 (R_2' / s + R_1 / (2s - 1))}{V_1 ((R_1 + R_2' / s + R_1 / (2s - 1))^2 + (X_1 + X_2')^2)}, \quad (2)$$

де  $m_1$  - число фаз;  $U_1$  - напруга живлення, В;  $V_1$  - швидкість магнітного поля статора, м/с;  $f$  - частота мережі, Гц;  $R_1, X_1$  - активний та індуктивний опори обмоток індуктора (статора), Ом;  $R_2', X_2'$  - приведені до обмоток індуктора активний та індуктивний опори обмоток бігуна, Ом;  $R_{\mu}, X_{\mu}$  - активний та індуктивний опори контуру намагнічування, Ом;  $\xi = 1/2p$  коефіцієнт несиметричності струмів вторинного контуру, де  $p$  - число пар полюсів;  $s = (V_1 - V) / V_1$  ковзання, де  $V$  - швидкість бігуна, м/с;  $N$  - кількість паралельно ввімкнених двигунів.

По формулі (2) робиться розрахунок характеристики при зміні ковзання  $s$  від 1 до -0,05 і будується тягова характеристика  $F = f(V)$  (рис.2). Розрахунок перехідних процесів виконано для ЛАД з потужністю  $P_2 = 21$  кВт, тяговим зусиллям  $F_{c(ном)} = 3500$  Н, номінальною швидкістю  $V = 6$  м/с, числом пар полюсів  $p = 1, 2, 3$  і 4.

Для визначення часу перехідного процесу проведемо перетворення у рівнянні (1):

$$F_{\hat{a}i}(s) \pm F_c = m[a(s) \pm g], \quad (3)$$

де  $a(s)$  - прискорення, що створюється електромагнітним полем, м/с<sup>2</sup>.

Графік залежності  $a^{-1} = f(V)$  наведено на рис. 3.

Скоротимо ліву та праву частину рівняння на  $m$ . Замінімо вираз  $[a(s) \pm g]$  на  $a$  і отримаємо:

$$a = [F_{em}(s) \pm F_c] / m, \quad (4)$$

або

$$a = \frac{dV}{dt}. \quad (5)$$

Перетворимо вираз (5):  $adt = dV$ ,  $dt = a^{-1}dV$ .

Проінтегрувавши ліву і праву частини попереднього виразу, отримаємо:

$$\int_0^{t_n} dt = \int_0^{V_n} a^{-1} dV, \quad (6)$$

$$t_n = a^{-1} \int_0^{V_n} dV, \quad (7)$$

де  $t_n$  - час перехідного процесу, с;  $V_n$  - номінальна швидкість бігуна, м/с.

Отриманий інтеграл незручний для подальших розрахунків, тому запишемо його у вигляді суми:

$$t = a^{-1} \int_0^{V_n} dV = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (8)$$

$$\Delta t_i = \frac{(a_i^{-1} + a_{i-1}^{-1}) V_{\max}}{2n}, \quad (9)$$

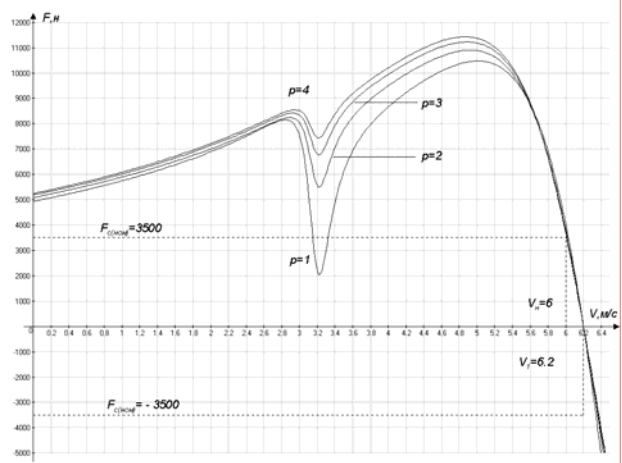


Рис.2. Типова тягова характеристика ЛАД

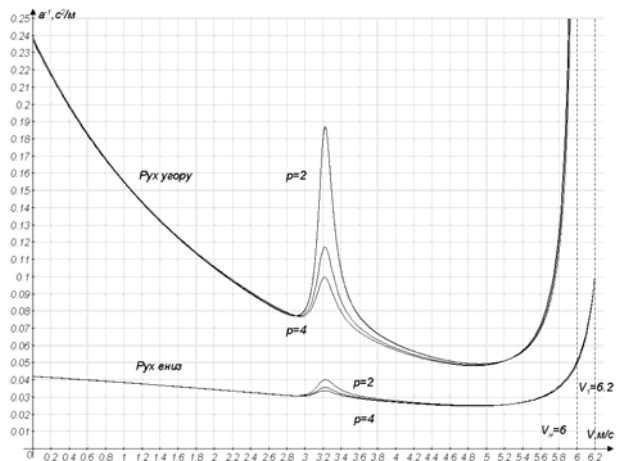


Рис.3. Залежність  $a^{-1} = f(V)$

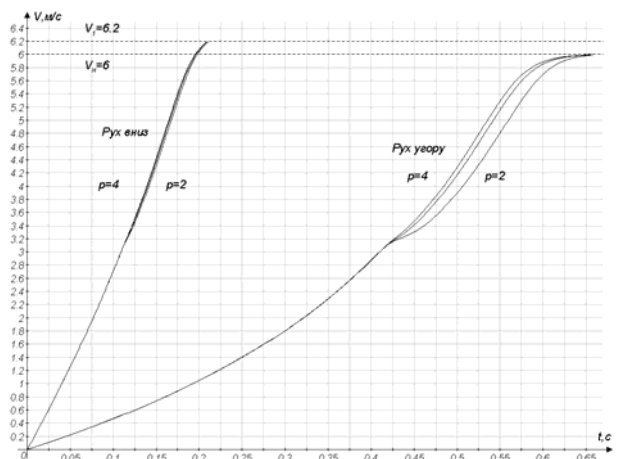


Рис.4. Залежність  $V = f(t)$

де  $p$  - число відрізків, на які розбивається інтервал побудови. Для наближеного обчислення значення цього інтегралу застосуємо метод трапецій.

Далі розрахуємо рух бігуна вгору (рис.4):

$$[F_{em}(V) - F_c] = f(V), \quad (10)$$

і за формулою для оберненого прискорення:

$$a^{-1} = \frac{m}{F_{em}(s) - F_c}, \quad (11)$$

де  $m = \frac{F_c}{g}$  - маса бігуна, кг. Таким чином, розрахуємо

рух бігуна вниз (рис.4):

$$[F_{em}(V) + F_c] = f(V), \quad (12)$$

$$a^{-1} = \frac{m}{F_{em}(s) + F_c}. \quad (13)$$

Графік залежності  $V = f(t)$  (рис. 4),  $t_i$  - час, с:

$$t_i = \frac{a_i^{-1} + a_{i-1}^{-1}}{2} \cdot \frac{V}{n} + t_{i-1}, \quad (14)$$

де  $n$  - кількість частин, на яку розбивається ділянка побудови;  $V_{max}$  - швидкість бігуна,  $V = (1-s)V_1$ .

Графік залежності  $H = f(V, t)$  (рис. 5) побудуємо за формулою:

$$H_i = \frac{(V_i + V_{i-1})}{2} \Delta t_i + H_{i-1}, \quad (15)$$

де  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  - елементарний час, с;  $H_i$  - висота підіймання бігуна, м.

Нехай бігун починає вільно падати зі стану спокою без початкової швидкості з прискоренням  $g$  (рис. 6, б). Позначимо початкову висоту ударника над наголовником (ковадлом) через  $h$ , час його падіння з цієї висоти до ковадла - через  $t$  і швидкість, досягнуто ударником у момент падіння на ковадло - через  $V$ :

$$h = \frac{1}{2} g t^2 = \frac{V^2}{2g}. \quad (16)$$

Таким чином (рис.6), датчик  $D_1$  встановлюють на нульовій позначці, тобто коли бігун знаходиться у нижньому стані і п'ята стикається з ковадлом. Датчик  $D_2$  встановлюють на перетині кривої руху бігуна вгору під дією електромагнітного тягового зусилля, що його розвиває ЛАД (крива "а") з кривою "в", за законом якої бігун падав донизу під дією сили тяжіння з прискоренням  $g$ . Датчик  $D_3$  встановлюють на позначці заданої висоти  $H$ . Датчик  $D_4$  встановлюють на відмітці  $V_1$  - швидкості поля ЛАД, яку необхідно замінити на  $V_{max}$  - максимальну швидкість бігуна у момент досягання ним ковадла, яка визначається з формули:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2W_{max}}{m}}, \quad (17)$$

де  $W_{max}$  - максимальна енергія;

$$W_{max} = W_1 + W_{\Delta H}, \quad (18)$$

де  $W_1 = \frac{mV_1^2}{2}$  - енергія, яку може розвинути молот під дією електромагнітної сили;  $W_{\Delta H} = mg\Delta H_i$  - енергія, яку може розвинути молот на висоті  $\Delta H_i$  після проходження бігуном датчика  $D_4$  при русі донизу.

Розташування датчиків контролю положення бігуна при розробленій процедурі керування за відповідним алгоритмом та його автоматизації дозволить отримати максимальну енергію удару при мінімальних затратах електричної енергії молоту.

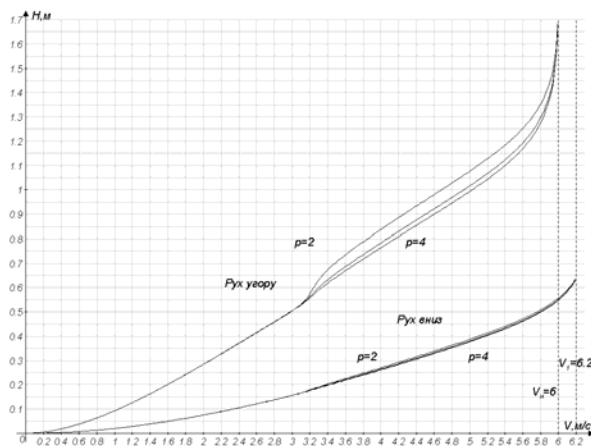


Рис. 5. Залежність  $H = f(V)$ .

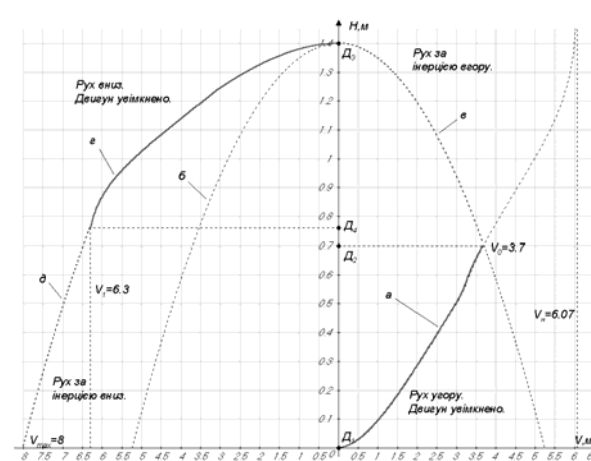


Рис. 6. Встановлення датчиків.

а) з урахуванням впливу електромагнітного тягового зусилля, що його розвиває ЛАД при русі бігуна вгору; б) без початкової швидкості зі стану спокою бігуна донизу; в) із початковою швидкістю  $V_0$  при русі бігуна угору; г) з урахуванням впливу тягового зусилля, що розвиває ЛАД при русі бігуна униз; д) з урахуванням початкової швидкості  $V_1$  - рух бігуна донизу.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Голенков Г.М. и др. А.С. 1375739 (СССР) Электромагнитный молот для забивки свай. Оpubл. В Б.Н., 1988, №7.
- [2] Голенков Г.М. Моделирование тяговых характеристик линейных асинхронных электродвигателей. Научно-практический журнал "Электротехника і електромеханіка", Харків, 2003, випуск 4, с 21-22.
- [3] Ильин В.А., Позняк Э.Г. Основы математического анализа. Часть 1. М., 1971г., С. 359 - 409.

Надійшла 15.10.2005