

3. Dautov R. Z., Karchevskiy M. M. *Vvedeniye v teoriyu metoda konechnykh elementov* [Introduction into theory of finite element method]. Kazan, Kazan State University Publ., 2004.
4. Пин В. П. *Методы и технологии конечных элементов* [Methods and technologies of finite elements]. Novosibirsk, INM&MG SB RAS Publ., 2009.
5. Shaidurov V. V. *Mnogosetochnyye metody konechnykh elementov* [Multigrid methods for finite elements]. Moscow, Nauka Publ., 1989.
6. Streng G., Fix G. *Teoriya metodov konechnykh elementov* [Theory of finite element methods]. Moscow, Mir Publ., 1977.
7. Gileva L., Shaydurov V., Dobronets B. The triangular Hermite finite element complementing the Bogner-Fox-Schmit rectangle. *Applied Mathematics*. 2013. Vol. 5, no. 12A, p. 50–56.
8. Bogner F. K., Fox R. L., Schmit L. A. The generation of interelement compatible stiffness and mass matrices by the use of interpolation formulas. *Proceedings of the Conference on Matrix Methods in Structural Mechanics*, Ohio: Wright-Patterson Air Force Base, 1965, p. 397–444.
9. Zhang S. On the full C_1 - Q_k finite element spaces on rectangles and cuboids. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 2010. Vol. 2, no. 6, p. 701–721.
10. Adams R. A., Fournier J. J. F. *Sobolev spaces*. New York : Academic Press, 2003.

© Шайдуров В. В., Шуть С. В., 2014

УДК 658.14+621.975

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОЛОТА

И. Я. Шестаков¹, Е. Н. Фисенко¹, И. А. Ремизов²

¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: info@sibsau.ru

² Красноярский государственный медицинский университет
имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого
Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1
E-mail: rector@krsk.info

Рассматривается способ работы молота, приводом которого является линейный электродинамический двигатель. Рассмотрена связь импульса тока в обмотке возбуждения ротора с энергией удара. При статическом режиме работы электродинамического молота в обмотку катушки-статора и в обмотку возбуждения ротора подаются токи, величина которых достаточна для втягивания ротора в статор и удерживания его в верхнем положении. Затем в обмотку возбуждения подаются импульсы тока для обеспечения рабочего хода ротора. Направление импульса тока в обмотке возбуждения противоположно направлению тока в статическом режиме. Длительность импульса тока меньше, чем время перемагничивания магнитопровода статора, но превышает длительность рабочего хода ротора. Приведены результаты испытаний электродинамических молотов.

Ключевые слова: электродинамический молот, импульс тока, время перемагничивания, магнитопровод, ротор.

WORK FEATURES OF ELECTRODYNAMIC HAMMER

I. Y. Shestakov¹, E. N. Fisenko¹, I. A. Remizov²

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: info@sibsau.ru

²Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V. F. Voino-Yasenetsky
1, Partizan Zheleznyak str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation
E-mail: rector@krsk.info

The article discusses a hammer operation technique, the drive of which is a linear electrodynamic motor. The relationship between the current pulse in the rotor field winding with impact energy is studied. In static mode of the electrodynamic hammer the currents are fed to coil winding and the rotor field winding, the current magnitude is sufficient to draw the rotor into the stator and keeping it in the upper position. Then current pulse is fed to the rotor field winding to provide the rotor stroke. The direction of the current pulse is the opposite to the current direction in the static mode. Current pulse duration is shorter than it takes to reverse magnetization of the stator magnetic core, but it exceeds the duration of the rotor stroke. The results of tests of electrodynamic hammers are presented.

Keywords: electrodynamic hammer, current pulse, time of magnetization reversal, magnetic core, rotor.

В радиопромышленности, приборостроении широко применяется холодная штамповка. Это объясняется тем, что детали, изготавливаемые из листового материала, можно получить сложной конфигурации, высокой точности, стабильных размеров при высокой производительности.

Для холодной штамповки в основном используются кузнечно-прессовые машины (КПМ), в которых вращательное движение преобразуется в возвратно-поступательное перемещение. Применение линейных электродинамических двигателей в КПМ позволит непосредственно преобразовать электроэнергию в кинетическую прямолинейного движения инструмента, что существенно упрощает привод машин, повышает надежность, производительность листовой штамповки. Однако широкого применения линейные электродинамические двигатели в КПМ не получили из-за недостаточности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в этой области. В данной статье рассматривается способ работы молота, приводом которого является линейный электродинамический двигатель. Это позволило повысить энергию удара и КПД преобразования электрической энергии в механическую с 70 до 81 %.

Энергия удара инструмента пропорциональна квадрату скорости движущихся масс в момент удара. Эта скорость может быть определена следующим образом:

$$V = a \cdot \tau, \quad (1)$$

где V – скорость в момент удара; a – ускорение движущихся масс (масса бабы + масса ротора + масса инструмента); τ – время рабочего хода, т. е. время движения инструмента от верхнего положения до момента удара о заготовку.

Ускорение приближенно можно определить как

$$a = F/m, \quad (2)$$

где F – электромагнитная сила, действующая в рабочем зазоре катушки-статора на обмотку возбуждения ротора; m – величина движущихся масс.

Электромагнитная сила определяется по известному закону

$$F = B \cdot I \cdot l, \quad (3)$$

где B – магнитная индукция в рабочем зазоре; I – ток в обмотке возбуждения ротора; l – длина проводника, находящегося в рабочем зазоре.

Магнитная индукция в рабочем зазоре определяется как

$$B = f(F_{\text{ст}} \pm F_{\text{р}}), \quad (4)$$

где f – функция зависимости магнитной индукции от магнитодвижущей силы; $F_{\text{ст}}$ – магнитодвижущая сила от обмотки катушки-статора; $F_{\text{р}}$ – магнитодвижущая сила от обмотки возбуждения ротора. Магнитодвижущая сила – величина векторная, поэтому при совпадении направлений векторов магнитная индукция максимальная. Направление магнитодвижущей силы определяется направлением тока в обмотке, поэтому при одинаковом направлении токов в обмотках ротора и статора магнитодвижущие силы складываются (знак «+» в формуле (4)). Это происходит в статическом режиме работы молота, значит магнитная индукция в рабочем зазоре максимальная. В режиме рабочего хода направление тока в обмотке возбуждения меняется на противоположное. В этот же момент должно начинаться перемагничивание магнитопровода статора. Из-за инерционности магнитных диполей материала статора перемагничивание начинается через определенный промежуток времени. Установлено экспериментально, что этот промежуток времени для литого массивного магнитопровода составляет 100–150 мс. Поэтому длительность импульса тока должна быть меньше, чем время перемагничивания, так как в течение этого времени магнитная индукция в рабочем зазоре максимальна, значит, и развиваемая электромагнитная сила максимальная, стало быть, энергия удара повышенная.

Из выражений (1) и (2) видно, что конечная скорость V определяется временем действия ускорения a и электромагнитной силы F . Для получения максимальной скорости движущихся масс необходимо, чтобы время действия силы F (а значит, длительность импульса тока I) было больше, чем длительность рабочего хода ротора. При этом энергия удара повышенная по сравнению с тем, когда длительность импульса тока в обмотке возбуждения меньше, чем время рабочего хода ротора.

На рис. 1 изображен электродинамический привод молота, состоящий из обмотки-катушки статора 1, обмотки возбуждения ротора 2, ротора 3, блока управления БУ, магнитопровода 4; 0-0 – положение обрабатываемой поверхности.

На рис. 2–4 изображено изменение магнитной индукции B , тока в обмотке возбуждения I , перемещение ротора x в зависимости от времени при различной длительности импульса тока $\tau_{\text{ит}}$, рабочего хода $\tau_{\text{рх}}$ и перемагничивания $\tau_{\text{п}}$.

Управление работой электродинамического молота осуществляют следующим образом: в статическом

режиме от блока управления БУ подают ток I_k в обмотку катушки-статора 1 и ток I_0 в обмотку возбуждения 2 ротора 3. Величину токов подбирают достаточной для втягивания ротора 3 в статор и удерживания ротора в верхнем положении – статический режим. При этом направление токов I_0, I_k в обмотках 1 и 2 должно быть одинаковое. Это приводит к сложению магнитодвижущих сил от двух обмоток в рабочем зазоре.

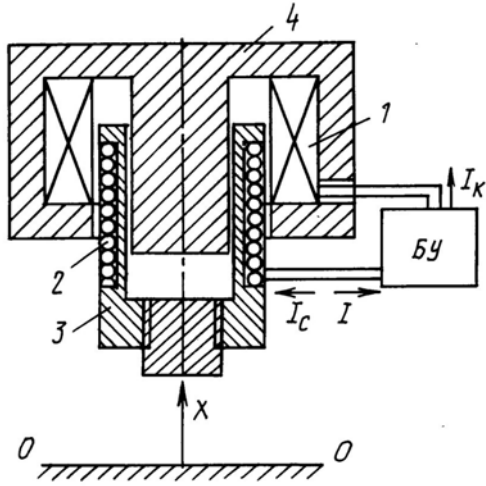


Рис. 1

В режиме рабочего хода в обмотку возбуждения 2 ротора подают импульс тока I , направление которого противоположно току в статическом режиме I_0 (рис. 2–4).

При длительности импульса тока $\tau_{ит}$ большей, чем время переманчивания τ_n , происходит уменьшение магнитной индукции B в рабочем зазоре (рис. 2). Это приводит к снижению энергии удара.

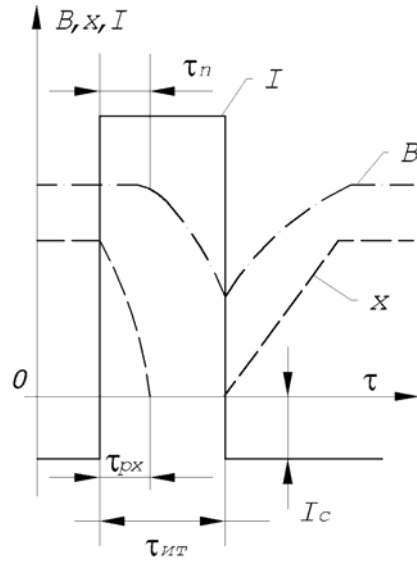


Рис. 2

При длительности импульса тока $\tau_{ит}$ меньшей, чем длительность рабочего хода $\tau_{рх}$, происходит снижение энергии удара, так как электромагнитная сила F не действует в течение всего рабочего хода (рис. 3).

При длительности импульса тока $\tau_{ит}$ большей, чем время рабочего хода $\tau_{рх}$, и меньшей, чем время переманчивания τ_n (рис. 4), энергия удара будет максимальной.

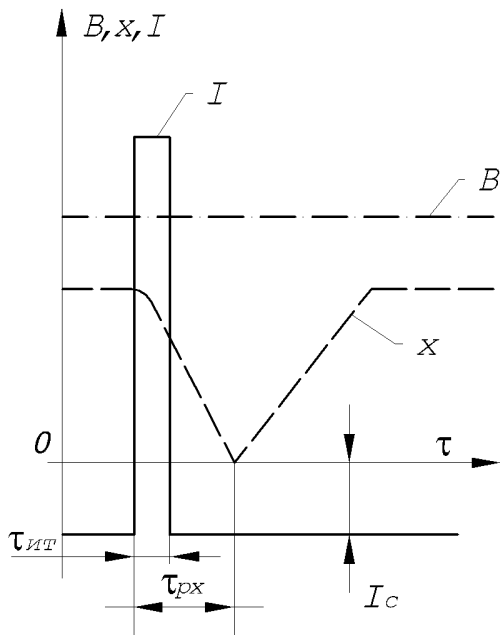


Рис. 3

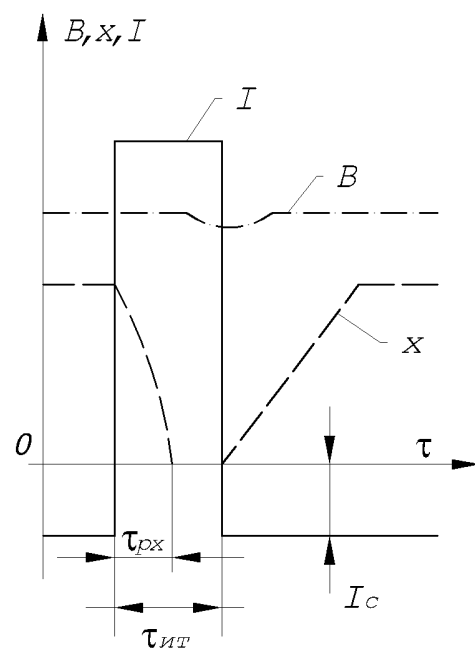


Рис. 4

Результаты испытаний электродинамических молотов

Способ работы	Длительность импульса токов $\tau_{ит}$, мс	Время рабочего хода $\tau_{рх}$, мс	Время перемагничивания $\tau_{п}$, мс	Энергия удара, Дж	КПД, %
Патент 2062168	40	30	120	210	81
А. С. 544495	150	30	120	185	75
А. С. 544495	20	34	120	176	74

Был изготовлен электродинамический молот с литым магнитопроводом. В таблице приведены результаты испытаний изготовленного электродинамического молота по вышерассмотренному способу работы [1; 2].

Для сравнения приведены данные испытаний электродинамического молота авторов [3]. Электрическая мощность катушки-статора в обоих случаях одинакова – 190 Вт.

Результаты испытаний показали, что КПД предложенной конструкции выше прототипов на 6–7 %. Опытная эксплуатация в промышленных условиях доказала надежность работы подобной конструкции.

Библиографические ссылки

1. Пат. 2062168 Российская Федерация, МКИ⁶ В 21 J 7/30. Способ управления работой электродинамического молота / Стрюк А. И., Безъязыков С. А., Шестаков И. Я., Шелковский О. Л.. Оpubл. 20.06.96, Бюл. № 17.

2. Стрюк А. И., Шестаков И. Я. Установка электрообработки с линейным электродинамическим двигателем // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. № 3 (10). С. 65–67.

3. А. с. 544495. Электромагнитный молот / Е. И. Пучков, В. П. Вяткин, Н. Н. Васильев. Заявл. 17.04.1974 (21) 201 МКИ⁶ В 21 J 7/30. 1977.

References

1. Struk A. I., Bezzyazkov S. A., Shestakov I. Y., Shelkovskiy O. L. *Sposob upravleniy rabotoy elektrodinamicheskogo molota* [Method of operating electrodynamic hammer]. Patent RF, no. 2062168, МКИ⁶ В21J7/30, 1996.

2. Struk A. I., Shestakov I. Y. [Installing electroprocessing electrodynamic linear motor]. *Vestnik SibGAU*. 2006, vol. 10, no. 3, p. 65–67. (In Russ.)

3. Puchkov E. P., Vyatkin V. P., Vasilev N. N. A. s. № 544495, МКИ⁶ В 21 J 7/30. *Elektromagnitnyy molot* [Electromagnetic hammer]. 1977.