DOI: 10.17117/na.2016.11.02.176

<http://ucom.ru/doc/na.2016.11.02.176.pdf>

Поступила (Received): 24.11.2016

Нейман Л.А. Исследование процесса ударного взаимодействия в электромеханической системе с инерционным преобразователем

Neyman L.A.
Investigation of shock interaction in an
electromechanical system with inertial transducer

Рассмотрен процесс взаимодействия импульсов сил в задачах моделирования при взаимодействии бойка и инерционного преобразователя энергии. Процесс характеризуется потерями кинетической энергии при ударе. Получены зависимости для количественной оценки кинетических энергий при энергообмене ударом

Ключевые слова: линейный электропривод, электромагнитный двигатель, ударная система, энергообмен ударом, импульсы сил, потери кинетической энергии

The process of interaction of pulses of power in modeling problems in the interaction of the firing pin and the inertial energy converter. The process is characterized by the loss of kinetic energy on impact. The dependencies for the quantification of the kinetic energy at the energy exchange impact

Key words: linear actuator, an electromagnetic motor, shock system, the energy exchange impact, pulses forces, loss of kinetic energy

Нейман Людмила Андреевна

Кандидат технических наук, доцент
Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

Neyman Lyudmila Andreevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Novosibirsk state technical university
Novosibirsk, Karl Marx ave., 20

В различных областях техники используются низкочастотные механизмы и устройства ударного действия, использующих в качестве электропривода электромагнитный двигатель возвратно-поступательного действия (ЛЭМД) [1-3].

Наиболее широкую известность получили линейные синхронные электромагнитные машины и механизмы, для которых частота колебаний ударной массы (бойка) равна или кратна частоте питающего источника [4].

Возросшие требования к повышению силовых и энергетических показателей механизмов и устройств на основе ЛЭМД, свидетельствует о необходимости поиска путей технического решения данной проблемы [5-7].

Повышение удельных показателей, прежде всего, связано с вопросами совершенствования методик по их расчету и проектированию [8-12].

Также актуально решение вопросов, связанных с нагревом и охлаждением ЛЭМД работающих в различных режимах [13-18].

В особенности большие сложности возникают при расчетах динамических режимов зависящих от времени, скорости, различного рода потерь энергии в электромеханической системе и т.д. [19-26].

Важным моментом в задачах моделирования электромагнитных ударных систем с инерционным реверсом бойка [27-30] является решение вопросов, связанных с взаимодействием импульсов сил при частично упругом ударе.

Расчетная схема механической ударной системы с инерционным реверсом представлена на рис. 1. Ударная масса бойка m_1 совершает возвратно-поступательные движения и периодически взаимодействует с инерционным преобразователем массой m_3 . При работе ударного узла направление движения инерционного преобразователя находится в противофазе относительно движения бойка (рис. 1). При энергообмене ударом кинетическая энергия инерционной массы m_3 переходит в потенциальную энергию при сжатии пружины и затем в кинетическую энергию на встречном ходе. Учитывая упругие и диссипативные свойства материала, полагаем, что в процессе удара изменяются физические свойства массы тел, вызванные деформацией и неполным восстановлением их объемов. Проекция скоростей центров масс в конце упругого удара (рис. 1, б)

$$\bar{v}_1 = \bar{v} + k_B (\bar{v} - \bar{v}_1) = \bar{v}(1 + k_B) - k_B v_1; \quad (1)$$

$$\bar{v}_3 = \bar{v} + k_B (\bar{v} - \bar{v}_3) = \bar{v}(1 + k_B) - k_B v_3; \quad (2)$$

где v_1, v_3 – скорости центра масс бойка и инерционного преобразователя в начале удара; $\bar{v}_1, \bar{v}_3$ – скорости центра масс бойка и инерционного преобразователя в конце упругого удара; $\bar{v}$ – общая скорость центра масс абсолютно неупругого удара; k_B – коэффициент восстановления скорости ($0 \leq k_B \leq 1$).

Рис. 1. Расчетная схема элементов ударной системы инерционного реверса

Проекция общей скорости центра масс абсолютно неупругого удара

$$\bar{v} = \frac{m_1 v_1 + m_3 v_3}{m_1 + m_3}. \quad (3)$$

Решая совместно (1), (2) и (3), получим проекции скоростей центра масс в конце упругого удара через значения скоростей в начале удара

$$\bar{v}_1 = v_1 - (1 + k_B) \frac{m_3}{m_1 + m_3} (v_1 - v_3), \quad (4)$$

$$\bar{v}_3 = v_3 + (1 + k_B) \frac{m_1}{m_1 + m_3} (v_1 - v_3), \quad (5)$$

Ударный импульс взаимных реакций тел за весь период упругого удара может быть выражен через равенство

$$S_1 = S_I + S_{II} = (1 + k_B) S_I, \quad (6)$$

где S_I – ударный импульс первой фазы удара, соответствующий наибольшей деформации тел; S_{II} – ударный импульс второй фазы удара; $k_B = \frac{S_{II}}{S_I}$.

Применяя теорему об изменении количества движения, импульсы ударных сил за время первой фазы удара

$$\begin{cases} m_1(\bar{v} - v_1) = -S_I; \\ m_2(\bar{v} - v_3) = S_I, \end{cases} \quad (7)$$

На основании равенств (3)3, (6) и (7) ударный импульс для каждой из соударяющихся масс (рис. 1, б)

$$S_I = (1 + k_B) \frac{m_1 m_3}{m_1 + m_3} (v_1 - v_3).$$

Особый интерес с позиции энергопреобразования представляет приобретаемая кинетическая энергия бойка в процессе энергообмена ударом. Принимая во внимание равенство (4) и то, что движение инерционных масс (рис. 1) находится в противофазе, кинетическая энергия бойка в конце упругого удара с учетом проекций скоростей составит

$$\bar{T}_1 = \frac{m_1}{2} \left[v_1 - (1 + k_B) \frac{m_3}{m_1 + m_3} (v_1 + v_3) \right]^2.$$

На основании последнего уравнения отношение кинетической энергии бойка в конце упругого удара к кинетической энергии в начале удара можно выразить в виде

$$\frac{\bar{T}_1}{T_1} = \left[1 - \frac{(1 + k_B)}{\frac{m_1}{m_3} + 1} \left(1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \right]^2, \quad (8)$$

где $T_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2}$ – кинетическая энергия бойка в начале удара.

Влияние параметров инерционной ударной системы с потерями кинетической энергии на деформацию по выражению (8) для $k_B = 0,9$ рассмотрено на диаграмме, приведенной на рис. 2.

Учитывая, что при ударе частично упругих тел закон сохранения энергии не выполняется вследствие деформации, которая сохраняется после удара, то потеря их кинетической энергии составит

$$\Delta T = \left[\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_3 v_3^2}{2} \right] - \left[\frac{m_1 \bar{v}_1^2}{2} + \frac{m_3 \bar{v}_3^2}{2} \right], \quad (9)$$

где первые два слагаемых правой части определяют кинетическую энергию соударяющихся масс в начале удара и вторые два слагаемых соответственно кинетическую энергию соударяющихся масс в конце удара.

После подстановки (4) и (5) в выражение (9) и, преобразовывая его, получим потери кинетической энергии соударяющихся масс, выраженные через скорости, которыми эти массы обладали в начале удара.

$$\Delta T = (1 - k_B^2) \frac{m_1 m_3 (v_1 - v_3)^2}{2(m_1 + m_3)}. \quad (10)$$

Рис. 2. Отношение кинетических энергий бойка при энергообмене ударом

Рис. 3. Зависимость потерь кинетической энергии на деформацию

Приводя (10) к безразмерным величинам относительно кинетической энергии соударяющихся масс в начале удара, и предварительно спроецировав скорости, получим

$$\Delta T^* = (1 - k_B^2) \frac{m_1}{m_3} \left(1 + \frac{v_3}{v_1}\right)^2 / \left(\left(\frac{m_1}{m_3} + 1\right) \left[\frac{m_1}{m_3} + \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2 \right] \right). \quad (11)$$

Зависимости потерь кинетической энергии на деформацию от параметров ударной системы по уравнению (11) для $k_B = 0,9$ приведены на диаграмме рис. 3.

Список используемых источников:

1. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий // Электротехника. 2003. № 9. С. 25–30.
2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Анализ показателей электромагнитных ударных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1996. № 2. С. 72–80.
3. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 220–224.
4. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // Электротехника. 2014. № 12. С. 45–49.
5. Нейман В.Ю. Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2003. № 1. С. 105–112.
6. Нейман В.Ю. Петрова А.А. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. 2007. № 9. С. 47а–50.
7. Нейман В.Ю. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: Наука, техника, управление. 2010. №8. С. 29–31.
8. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы: [сб. науч. тр.]. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. С. 177–187.
9. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2015. № 1 (58). С. 246–256.

10. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 2 (97). С. 214–218.
11. Нейман Л. А. Исследование сил одностороннего магнитного притяжения якоря соленоидного электромагнита // Электротехника. 2015. № 10. С. 55–59.
12. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // Транспорт: Наука, техника, управление. 2008. № 6. С. 21–24.
13. Нейман В.Ю., Нейман Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем принудительного охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 2. С. 166–175.
14. Нейман Л.А., Скотников А.А., Нейман В.Ю. Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах // Известия вузов. Электромеханика. 2012. № 6. С. 50–54.
15. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. Сравнение геометрически подобных систем электромагнитов по условию постоянства теплового критерия // Электротехника. 2011. № 12. С. 14–16.
16. Нейман Л.А. Оценка перегрузочной способности ударного электромагнитного привода по средней температуре перегрева в переходных режимах // Известия вузов. Электромеханика. 2013. № 6. С. 58–61.
17. Нейман Л.А., Скотников А.А. Анализ процесса нагрева электромагнитного двигателя работающего в импульсном режиме // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 2. С. 319–322.
18. Нейман Л.А. Исследование перегрузочной способности циклического электромагнитного привода в зависимости от начального превышения температуры в переходных тепловых режимах // Электротехника. 2014. № 7. С. 7–12.
19. Нейман Л. А. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2016. № 2 (31). С. 94–107.
20. Нейман Л. А. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 5. С. 32–40.
21. Нейман Л. А. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 3 (28). С. 75–87.
22. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 4. С. 154–162.
23. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19. № 1. С. 73–78.
24. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 6. С. 35–40.
25. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 4. С. 154–162.
26. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 3(28). С. 75–87.
27. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 280–285.
28. Нейман Л. А. Новый рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16, № 2. С. 72–81.
29. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 256–259.

30. Нейман Л.А. Анализ процессов энергопреобразования в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине с инерционным реверсом бойка // Известия Томского политехнического университета. Томск. Изд-во ТПУ, 2014. № 4, Т. 325. С. 157–163.

© 2016, Нейман Л.А.

Исследование процесса ударного взаимодействия в электромеханической системе с инерционным преобразователем

© 2016, Neyman L.A.

Investigation of shock interaction in an electromechanical system with inertial transducer