

РЕАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРЕХМАССОВОЙ «СЭМУД» НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ

Нейман Л.А., Нейман В.Ю.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Ключевые слова: динамическая модель, синхронная электромагнитная машина, электромагнитный двигатель, ударный узел, динамический расчет.

Аннотация. Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования и расширения возможностей динамического расчета при решении комплексной задачи анализа и синтеза различных вариантов схем однокатушечных синхронных электромагнитных машин ударного действия (СЭМУД). На основе созданной обобщенной модели рассмотрен пример реализации динамической модели трехмассовой СЭМУД с двухсторонним свободным выбегом бойка, получающим питание от промышленного источника по однополупериодной схеме выпрямления.

В различных областях техники широко применяются механизмы и устройства, созданные на базе линейных электромагнитных машин для обеспечения технологических процессов и производств при пластической деформации и разрушении материалов ударом [1–6].

Среди многочисленного класса электромагнитных машин следует выделить синхронные электромагнитные машины ударного действия (СЭМУД) с частотой до 3000 уд/мин [7–10].

Несмотря на то, что данный класс машин широко известен, методы по их расчету и проектированию по прежнему востребованы и продолжают совершенствоваться [11–15] и в особенности это касается расчета нестационарных процессов, связанных с большим числом взаимосвязанных факторов [16–19].

Проведение подобного рода расчетов сопровождается большими трудностями, связанными с необходимостью построения математических моделей наиболее точно отражающих динамическое состояние СЭМУД [20–23].

В этой связи, основываясь на единой методологической основе описания различных по конструкции однокатушечных СЭМУД, целесообразно рассмотреть обобщенную модель в виде многомассовой электромеханической системы с упругими связями (рис. 1). В качестве обобщенных координат (рис. 1) принимаем линейные перемещения центра масс бойка x_1 массой m_1 , рабочего инструмента x_2 массой m_2 , магнитопровода с закрепленной внутри катушкой x_3 массой m_3 и удерживающего (крепежного) устройства x_4 массой m_4 .

Уравнение электрического равновесия СЭМУД имеет вид

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i_\mu, x_1)}{dt}, \quad (1)$$

где $i = i_\pi + i_\mu$ – ток на входе источника; i_π – ток потерь; i_μ – ток намагничивания катушки; r – сопротивление катушки; $\psi(i_\mu, x_1)$ – потокосцепление катушки, зависящее от тока намагничивания i_μ и координаты x_1 положения бойка.

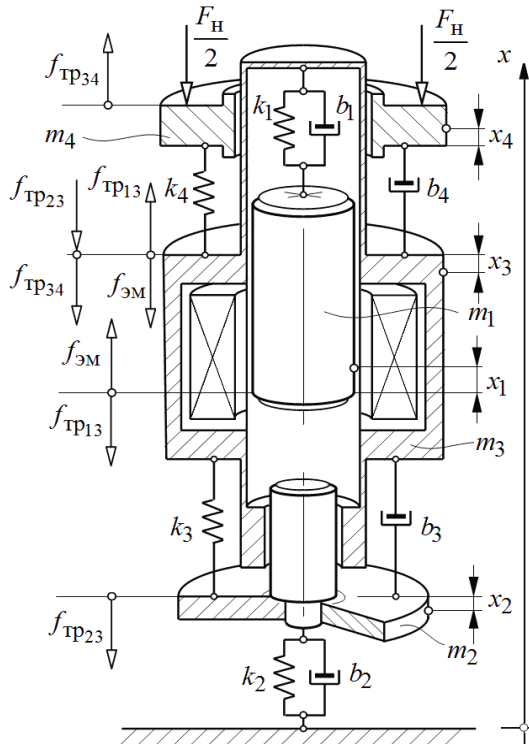


Рис. 1. Расчетная схема СЭМУД

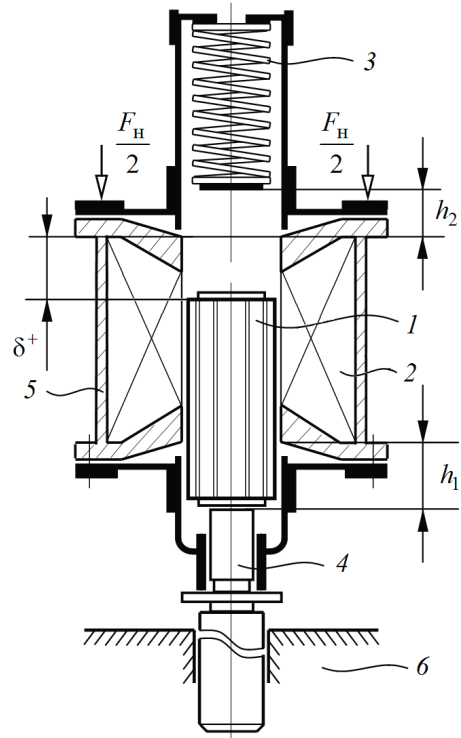


Рис. 2. Электромагнитный ударный узел трехмассовой СЭМУД: 1 – боек; 2 – катушка; 3 – пружина; 4 – рабочий инструмент; 5 – магнитопровод; 6 – деформируемая среда

Уравнение движения механической системы получим на основании уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = Q_i^{\Pi} + Q_i^{\Phi} + Q_i^B, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где $Q_i^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}$, $Q_i^{\Phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}$, Q_i^B – обобщенные силы, соответствующие потенциальной энергии, энергиям рассеяния сопротивления движению (диссипативная функция Релея), внешних воздействий и сил трения, N – число степеней свободы механической системы.

Рассматривая движение масс $m_1 \dots m_4$ в выбранной системе координат (рис. 1), кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N=4} m_i \dot{x}_i^2 = \frac{1}{2} (m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 + m_3 \dot{x}_3^2 + m_4 \dot{x}_4^2). \quad (3)$$

где \dot{x}_i – обобщенные скорости.

Обобщенные силы Q_i^{Π} , Q_i^{Φ} :

$$Q_i^{\Pi} = - \frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4} \frac{1}{2} [k_1 (x_1 - x_3)^2 + k_2 x_2^2 + k_3 (x_3 - x_2)^2 + k_4 (x_4 - x_3)^2]}{\partial x_i}, \quad (4)$$

где $k_1 \dots k_4$ – статические коэффициенты жесткости упругих связей;

$$Q_i^\Phi = - \frac{\partial \sum_{i=1}^{N=4} \frac{1}{2} \left[b_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_3)^2 + b_2 \dot{x}_2^2 + b_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 + b_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2 \right]}{\partial \dot{x}_i}, \quad (5)$$

где $b_1 \dots b_4$ – коэффициенты вязкого трения упругих связей.

Обобщенные силы внешних воздействий и силы трения:

$$Q_{x_1} = f_{эм}(i_\mu, x_1) - f_{тр13} \text{sign } \dot{x}_1; \quad Q_{x_2} = -f_{тр23} \text{sign } \dot{x}_2; \quad (6)$$

$$Q_{x_3} = -f_{эм}(i_\mu, x_1) + (f_{тр13} + f_{тр23} - f_{тр34}) \text{sign } \dot{x}_3; \quad (7)$$

$$Q_{x_4} = f_{тр34} \text{sign } \dot{x}_4 - F_H, \quad (8)$$

где $f_{эм}(i_\mu, x_1)$ – вынуждающая электромагнитная сила; $f_{тр13}, f_{тр23}, f_{тр34}$ – силы сухого трения скольжения; F_H – постоянная величина усилия нажатия.

Используя уравнение электрического равновесия (1) и уравнения Лагранжа второго рода (2) с учетом установленных зависимостей (3) – (5) и значений обобщенных сил внешних воздействий и сил трения (6) – (8) получим математическую модель СЭМУД без учета ударного взаимодействия.

В качестве примера рассмотрим основные этапы реализации динамической модели однокатушечной СЭМУД с двухсторонним свободным выбегом бойка, идентичной по конструкции и параметрам электромагнитной машины МС–18/36 [7]. Реализации расчета для четырехмассовой СЭМУД подробно рассмотрены в работах [21, 22].

Один из вариантов конструктивной схемы ударного узла трехмассовой СЭМУД приведен на рис. 2. Рабочий цикл машины подробно рассмотрен в работе [23].

В соответствии с (2) взяв частные производные от кинетической энергии и обобщенных сил (3) – (5), а также производные по времени, математическая модель динамического состояния СЭМУД (рис. 2) без учета ударного взаимодействия при наличии внешних воздействий и сил трения будет описываться системой дифференциальных уравнений. Дополняя полученную систему условиями соударения ударных масс и заданных пределов ограничения движения бойка, окончательный процесс движения следует рассматривать как результат наложения вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обусловленных различного рода потерями энергии в электрической, магнитной и механической системе [20 –23]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = ir + \frac{d\psi(i_\mu, x_1)}{dt}, \text{ где } i = i_H + i_\mu; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_H} - f_{тр13} \text{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i_\mu, x_1), \text{ если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2; \\ -\tilde{\lambda}_1 - f_{тр13} \text{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i_\mu, x_1), \text{ при } x_1 \geq h_1 + h_2; \\ -f_{тр13} \text{sign} \frac{dx_1}{dt} + f_{эм}(i_\mu, x_1), \text{ при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2, \text{ если } \frac{dx_1}{dt} < 0; \end{cases} \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -\frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_{и}} - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_3 - f_{\text{тр}23} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_3 - f_{\text{эм}}(i_{\mu}, x_1) + (f_{\text{тр}13} + f_{\text{тр}23}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_1 + h_2; \\ \tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_3 - f_{\text{эм}}(i_{\mu}, x_1) + (f_{\text{тр}13} + f_{\text{тр}23}) \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}, \\ \text{при } x_1 \geq h_1 + h_2; \end{cases} \end{cases}$$

где $\tilde{\lambda}_1 = b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3)$; $\tilde{\lambda}_2 = b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2$;

$\tilde{\lambda}_3 = b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_3 (x_3 - x_2)$; $\frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{и}}$, $\frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_{и}}$ – импульсы сил, действующие

на массы соударяющихся тел в конце частично упругого удара; v_1 , \bar{v}_1 – скорости центра массы бойка в начале и конце удара; v_2 , \bar{v}_2 – скорости центра массы рабочего инструмента в начале и конце удара; $\tau_{и}$ – длительность времени ударного импульса; h_1 – расстояние, пройденное бойком от положения магнитного равновесия до ударного сечения рабочего инструмента; h_2 – расстояние от положения магнитного равновесия до контакта с пружиной (рис. 2).

Последующее решение системы уравнений может быть выполнено с применением, например метода структурного моделирования в Matlab Simulink [24].

При изучении динамических процессов в СЭМУД необходимо дополнительно располагать точными сведениями о закономерности изменения потокосцепления $\psi = f(i_{\mu}, x_1)$ и электромагнитного усилия $f_{\text{эм}} = f(i_{\mu}, x_1)$ от тока намагничивания и координаты положения бойка, что связано с изучением характеристик магнитного поля, т.е. решением полевой задачи. Для решения полевой задачи и определения массива значений опорных точек статических параметров потокосцепления и электромагнитного усилия следует рекомендовать стандартные программы конечно-элементного моделирования FEMM, ELCUT или ANSYS [25].

Максимальная относительная погрешность при подобных расчетах лежит в пределах погрешности обработки экспериментальных данных и не превышает 6 – 8 % [22].

Список литературы

1. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
3. Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.

4. Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
5. 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.
6. Нейман В.Ю. Петрова А.А. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
7. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
8. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
9. 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.
10. Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А. Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II международной научно-практической конференции. – Саратов, 2011. – С. 271–277.
11. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы: Коллективная монография / Новосиб. гос. техн. ун-т; Под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.
12. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
13. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 57–62.
14. 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.
15. 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.
16. Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 50–53.
17. 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.
18. 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.
19. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.

20. 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.
21. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.
22. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–114.
23. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40.
24. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
25. 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.

Сведения об авторах:

Нейман Людмила Андреевна – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Электротехнические комплексы», НГТУ, г. Новосибирск;

Нейман Владимир Юрьевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Теоретических основ электротехники», НГТУ, г. Новосибирск.

REALIZATION OF THE DYNAMIC MODEL OF THE THREE-MASS «SCSIEM» ON THE BASIS OF THE GENERALIZED MODEL

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Keywords: dynamic model, synchronous electromagnetic machine, electromagnetic motor, shock unit, dynamic calculation.

Abstract. The relevance of the research is due to the need to improve and expand the possibilities of dynamic calculation when solving a complex task of analyzing and synthesizing various variants of single-coil synchronous electromagnetic machines of percussion action (SCSIEM). An example of the dynamical model based on the generalized one is considered for a three-mass SCSIEM with striker two-side free running-out powered from 50 Hz power supply trough a half-period rectifier.