

Моделирование и анализ реакции электромеханического устройства на случайное механическое воздействие

Борисова Светлана Юрьевна

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

Студент

Афанасьев Александр Петрович

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

К.т.н., зав. кафедрой технических дисциплин

Статья печатается в рамках реализации направления «Наука и инновации» Программы развития деятельности студенческих объединений «Свет с Востока» Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема, поддержанной Минобрнауки РФ в 2016 г.

Аннотация

В данной статье рассмотрена модель электромеханического устройства в виде простейшего электромагнита. Выполнен анализ результатов имитационного моделирования при случайном механическом воздействии.

Ключевые слова: электромеханическое устройство, моделирование в MATLAB, SIMULINK, математическая и физическая модель, мультифизическое моделирование.

Modeling and analysis of reaction electromechanical devices to random mechanical action

Borisova Svetlana Jur'evna

Sholom-Aleichem Priamursky State University

student

Afanas'ev Aleksandr Petrovich

Sholom-Aleichem Priamursky State University

Candidate of Technical Sciences, head of Department of technical sciences

Abstract

In this article the analysis of the mathematical and physical model of the electromagnetic solenoid. The research obtained a mathematical and physical model of solenoid.

Keywords: electromagnetic solenoid, simulation in MATLAB, SIMULINK, mathematical and physical model.

Электромагнитный соленоид (электромагнит) является основным электромеханическим компонентом, применяемым в широком спектре устройств – мехатронке, робототехнике, автомобилестроении и авиастроении.

Различные виды электромагнитов имеют свои конструктивные особенности, обусловленные функциональным назначением прибора, но общими элементами конструкции являются магнитопровод и катушка возбуждения [1, 2].

В исследовании анализировалась реакция электромеханического устройства, с конструктивными элементами, схематически представленными на рисунке 1.

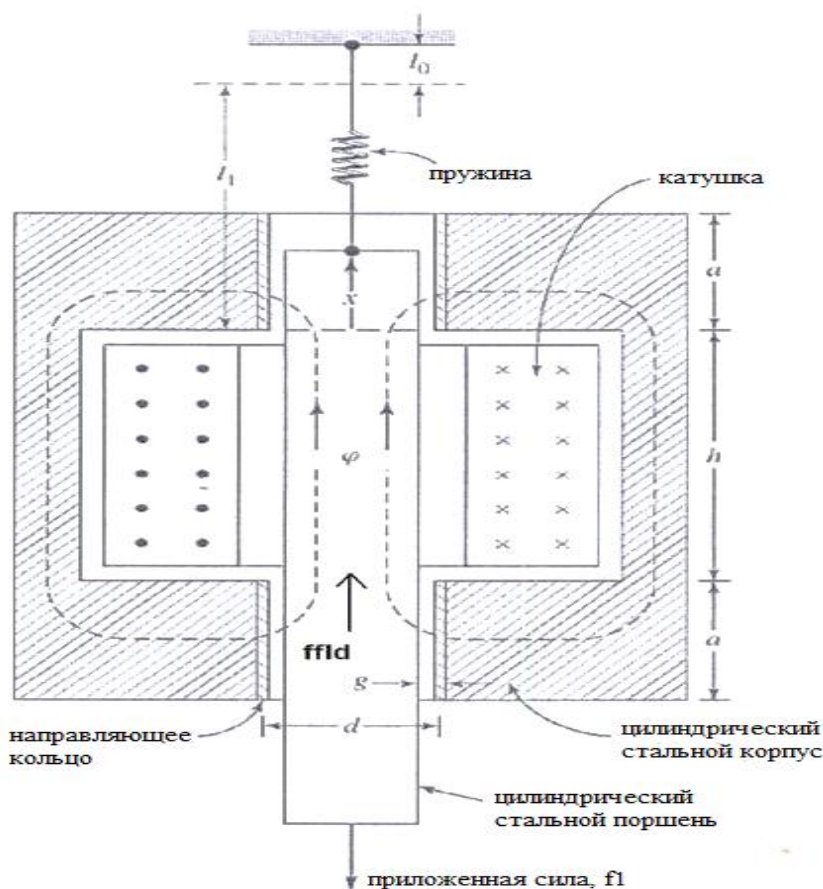


Рисунок 1 – Конструкция исследуемого электромеханического устройства

Цилиндрический подвижный стальной поршень, находящийся в стальной ферромагнитной оболочке соединен с пружиной жесткостью k . Катушка, внутри оболочки подключена к источнику постоянного напряжения.

Качественное описание принципа работы электромеханического устройства

Качественно рассмотрим процессы протекающие в электромеханическом устройстве при случайном внешнем силовом воздействии.

В результате протекания электрического тока по катушке, электрическая энергия будет переходить в энергию магнитного поля. Электромагнитная сила будет перемещать поршень в положительном направлении координаты, что, в свою очередь, будет приводить к изменению индуктивности катушки, так как сокращается дистанция для магнитного потока через воздушный зазор. В конце этого процесса, наступит момент, когда электромагнитная сила будет уравновешена упругой силой пружины и поступательное движение поршня прекратиться.

В случае внешнего механического воздействия F_0 изменится положение поршня, что в свою очередь, отразится на значении индуктивности электромеханического устройства. Энергетическое равновесие нарушится, и в системе появятся силы стремящиеся восстановить энергетическое равновесие. Возникнет точка нового равновесного состояния системы с учетом внешнего воздействия F_0 .

При исчезновении внешней силы F_0 , часть механической энергии, аккумулированной в пружине в результате электромагнитной индукции превратится в энергию магнитного поля, остальная часть рассеется в электрической цепи во время переходных процессов и вследствие потерь на трение.

Энергетический баланс рассматриваемой системы представлен на рисунке 2.

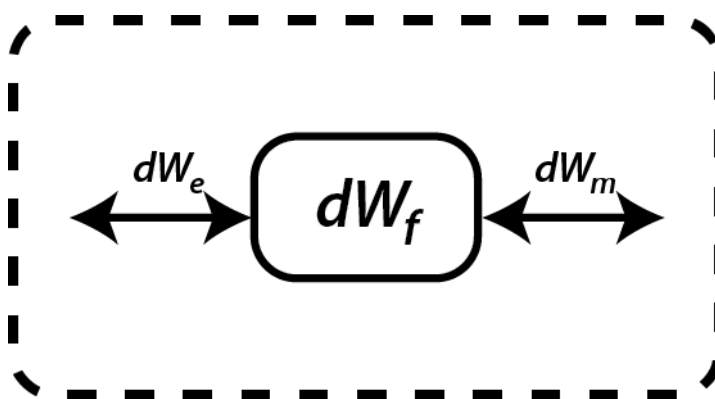


Рисунок 2 Элементарный энергетический баланс в электромеханическом устройстве

На представленном изображении приняты следующие обозначения:

dW_e – элементарная порция энергии электрического тока в катушке;

dW_f – элементарная порция энергии магнитного поля в катушке и магнитопроводе устройства;

dW_m – элементарная порция упругой механической энергии пружины.

Двойными стрелками акцентирована взаимная направленность энергетических потоков в рассматриваемом устройстве.

Математическая модель

Рассмотрим влияние положения поршня магнитопровода электромеханической системы на индуктивность устройства.

Электрическая составляющая описывается на основе II закона Кирхгофа. Предполагая линейную зависимость потокосцепления от величины тока протекающего по катушке получим:

$$u_0 = R \cdot i + \frac{d\lambda}{dt},$$

где

$$\lambda = L(x) \cdot i,$$

здесь u_0 – напряжение на клеммах электромагнита, R и i сопротивление и ток, протекающий по катушке, λ – потокосцепление.

Учитывая, что индуктивность $L(x)$ является функцией координаты поршня x , выполняя дифференцирование, получим следующее выражение для напряжения на клеммах электромагнита:

$$u_0 = R \cdot i + L(x) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{L(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}.$$

Считая ток i в качестве первой переменной состояния рассматриваемой системы, получим выражение описывающее процесс изменения данной переменной, т.е. уравнение эволюции электрической части устройства.

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L(x)} \left[u_0 - R \cdot i - i \cdot \frac{L(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \right] \quad (1)$$

Второй переменной состояния системы определим координату поршня – x .

Реакция механической части системы определяется II законом Ньютона

$$\sum F = M \cdot a = M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2},$$

где $\sum F$ – суммарное силовое воздействие на систему.

Представляя каждый компонент $\sum F$ в виде явного выражения получим:

$$f_{\text{пд}} - k(x - x_0) - b \frac{dx}{dt} - f_0 = M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2},$$

здесь $f_{\text{пд}}$ – электромагнитная сила обусловленная изменением индуктивности $L(x)$, $k(x - x_0)$ – упругая сила пружины соединённой с поршнем, $b \frac{dx}{dt}$ – сила сопротивления, пропорциональная скорости перемещения поршня, f_0 – внешнее силовое воздействие на поршень.

Принимая скорость перемещения поршня в качестве третьей переменной состояния системы, выведем уравнение эволюции данной переменной в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{M} \left[f_{fld} - b \cdot \frac{dx}{dt} - k \cdot (x - x_0) - f_0 \right] \quad (2)$$

Зависимость индуктивности от положения поршня $L = L(x)$ получим из выражения для магнитного сопротивления магнитному потоку в магнитопроводе и поршне.

$$R_M = \frac{g}{\mu_0 \cdot \pi \cdot x \cdot d} + \frac{g}{\mu_0 \cdot \pi \cdot a \cdot d} = \frac{g}{\mu_0 \cdot \pi \cdot a \cdot d} \cdot \left(\frac{a+x}{x} \right),$$

отсюда

$$L(x) = \frac{N^2}{R_M} = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot a \cdot d \cdot N^2}{g} \cdot \left(\frac{x}{a+x} \right) = L' \left(\frac{x}{a+x} \right), \quad (3)$$

здесь $L' = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot a \cdot d \cdot N^2}{g}$.

Как указывалось ранее, электромагнитные силы могут быть выведены из предположения линейности рассматриваемой системы, т.е. предполагая неизменность тока i в течении времени когда поршень переместится на элементарное расстояние dx , получим :

$$f_{fld} = \frac{dW_f}{dx} = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{dL(x)}{dx} = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{a \cdot L'}{(a+x)^2}. \quad (4)$$

Модель системы в Simulink

На основании уравнений (1-4) была составлена Simulink–модель [3, 4], в которой выделены механическая и электрическая подсистемы. На рисунке 3 представлена блочная структура данной модели.

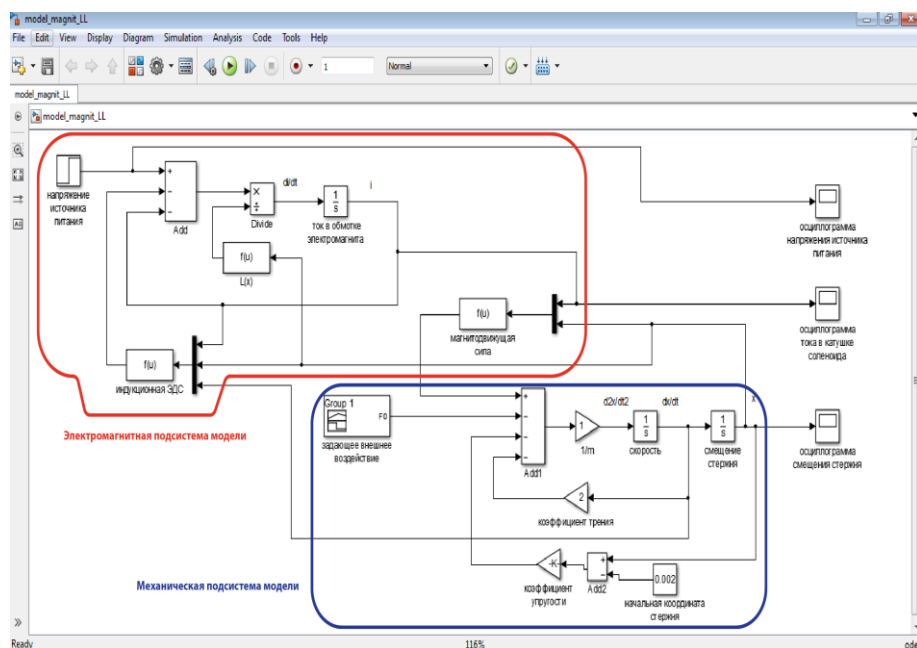


Рисунок 3 – Simulink модель рассматриваемой системы

В имитационном эксперименте для электромагнита были использованы следующие параметры:

1. Число витков соленоида – $N = 200$;
2. Толщина верхнего и нижнего основания магнитопровода $a = 10$ мм;
3. Диаметр расточки магнитопровода $d = 15$ мм;
4. Ширина воздушного зазора и направляющих колец $g = 1$ мм;
5. Сопротивление обмотки электромагнита $R = 1$ Ом;
6. Масса поршня $M = 0,3$ кг;
7. Жесткость пружины $k = 2667$ Н/м;
8. Коэффициент сопротивления $b = 2$ Н·с/м
9. Напряжение на клеммах электромагнита $u_0 = 0-5$ В;
10. Величина внешнего силового воздействия $f_0 = 0-10$ Н;
11. Начальное положение верхней кромки поршня $x_0 = 2$ мм.

Результаты моделирования

На рисунках 4-7 показаны результаты имитационного моделирования рассматриваемой модели.

На временных диаграммах явным образом прослеживается инерционность реакции модели на внешнее воздействие. Переходные процессы имеют выраженную затухающую составляющую, что свидетельствует об устойчивости системы с данными параметрами при внешнем силовом воздействии.

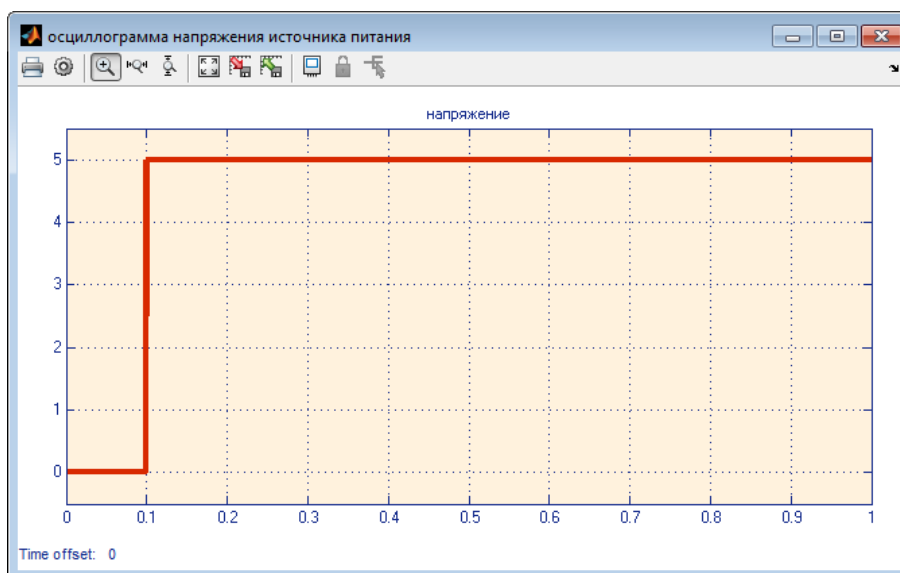


Рисунок 4 – Временная диаграмма напряжения подаваемого на клеммы электромагнита

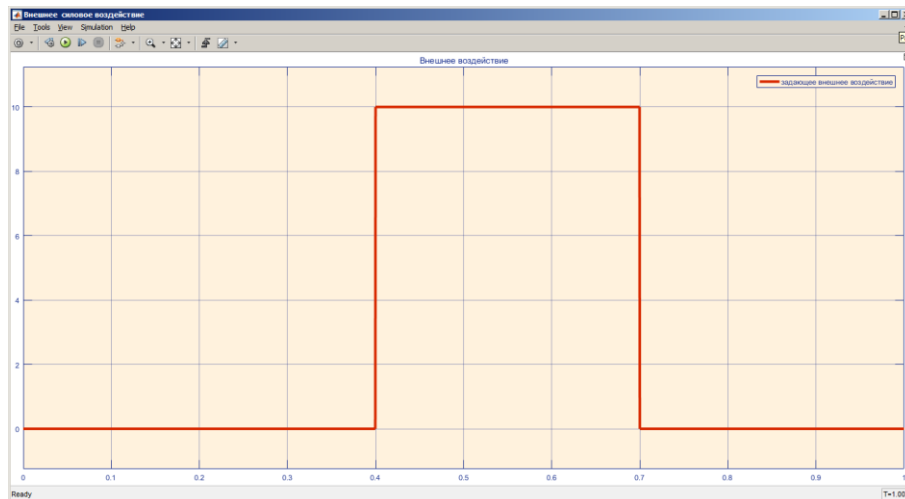


Рисунок 5 – Временная диаграмма внешнего силового воздействия

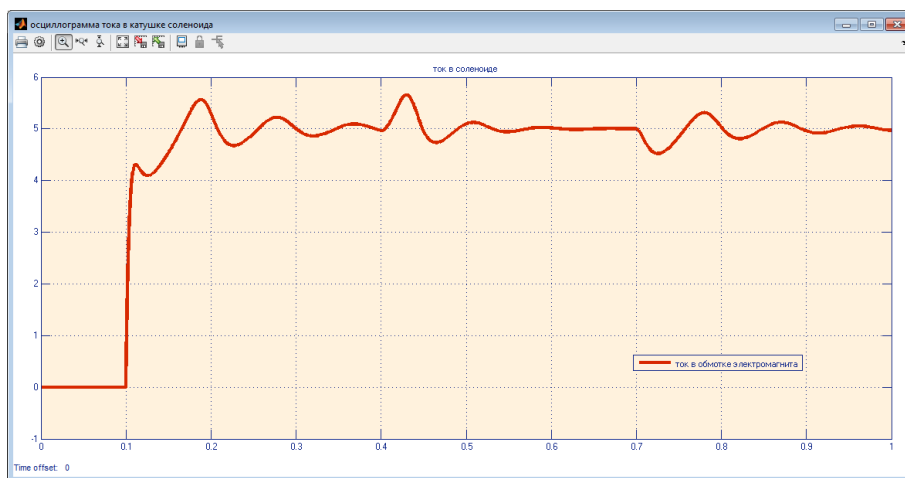


Рисунок 6 – Осциллограмма силы тока в катушке электромагнита

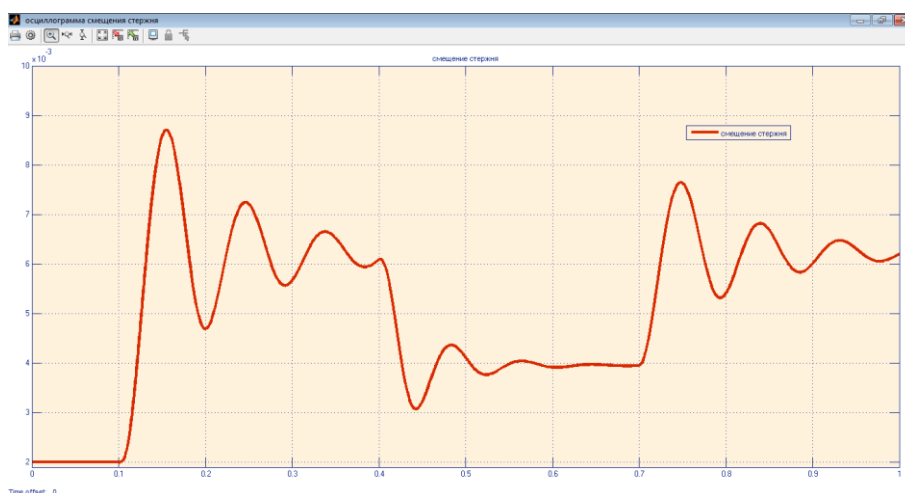


Рисунок 7 – Осциллограмма смещения металлического поршня

Выводы

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными в ходе экспериментов с реальными устройствами [5] позволяет сделать вывод, что расхождение между результатами натурного

эксперимента и данными полученными с помощью имитационной Simulink модели составляет не более 2%.

Таким образом, результаты, имитационного эксперимента с достаточной степенью достоверности совпадают с выводами, полученными при использовании аналитических инструментов.

Динамика переходных механических и электромагнитных процессов соответствует экспериментальным данным, полученным при использовании реальных электромеханических компонентов.

Построенная модель может служить хорошей базой для построения более специализированных моделей устройств, с обратной связью используемых в различных областях техники.

Библиографический список

1. Darula R., Stein G., Sorokin S. Numerical simulations of electromagnet exposed to vibration // Engineering MECHANICS. 2013. Т.20. № 6. С 439–448
2. Furlani E.P. Permanent Magnet and Electromechanical Devices: Materials, Analysis, and Applications. San Diego: Academic Press, 2001.
3. Mathworks: web page of MATLAB Simulink Simscape, on-line available at URL: <http://www.mathworks.com/products/simscape/>
4. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. М.: Диалог-МИФИ. 2004.
5. Розанов Ю.К., Кравцов Д.В. Экспериментальное определение характеристик элементов электромеханических систем с использованием частотных методов // Электротехника. 2000. №7.