

УДК 621.313.282.2

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

Новосибирский государственный технический университет

Актуальность исследований обусловлена необходимостью повышения точности при проведении динамических расчетов линейных электромагнитных приводов колебательного движения, применяемых в технических системах генерирования вибраций с частотой до 100 Гц. В проводимых исследованиях рассматривается решение задачи по созданию динамической модели одномассовой колебательной системы с электромагнитным приводом, характеризующей различные режимы ее работы и позволяющей производить всесторонний анализ электромеханических процессов методами структурного моделирования. Для решения полевой части задачи применялась стандартная программа конечно-элементного моделирования FEMM, для расчета динамической части задачи разрабатывался алгоритм расчета, реализованный с помощью аппарата структурного моделирования в среде Matlab Simulink. В работе рассматривается комплексный подход по созданию динамической модели электромагнитного привода колебательного движения. Основу динамической модели составляют дифференциальные уравнения, записанные для электрического равновесия нелинейной цепи и по принципу Даламбера для механической системы. Предложены алгоритм расчета и пример схемной реализации модели с использованием аппарата структурного моделирования, позволяющий учесть влияние насыщения и поток рассеяния в стальном магнитопроводе. Показано, что точность при динамических расчетах в значительной степени зависит от точности воспроизведения математических аналогов механических характеристик. Особое внимание в работе уделяется вопросу определения и учета параметров упругих связей и сил сухого трения. На примере расчета периодических электромеханических процессов одномассовой колебательной системы с электромагнитным приводом рассмотрены возможности для проведения всестороннего анализа рабочих режимов. По результатам исследований получены рекомендации для повышения точности расчетов электромеханических процессов.

Ключевые слова: вибрационные технологии, электромагнитный привод, динамическая модель, конечно-элементное моделирование, одномассовая колебательная система, методы структурного моделирования.

DOI: 10.17121/1727-2769-2015-3-75-87

Введение

Виброимпульсные технологии широко применяются в промышленности для обеспечения многих современных технологических процессов и производств. Перспективным направлением исследований в данной области является совершенствование машин и механизмов, созданных на базе электромагнитного привода возвратно-поступательного движения, обеспечивающего возможность в создании низкочастотных колебаний и вибраций с частотой до 100 Гц [1, 2].

Основными преимуществами в использовании электромагнитного привода являются относительно высокая надежность, повышенный ресурс, некоторые экономические выгоды при его производстве, возможность значительного снижения энергопотребления в резонансных и околорезонансных режимах, а также наиболее простой способ управления амплитудой вибраций независимо от частоты

[3–5]. Существующие методики точного учета конструктивных параметров электромагнитного привода и реализация новых рабочих циклов позволяют в разной степени улучшить их силовые и энергетические показатели [6–12].

Для повышения эффективности в использовании такого привода в технологических процессах еще на стадии проектирования возникает необходимость решения задачи по расчету динамических характеристик с последующей корректировкой тесно связанных параметров электрической, магнитной и механической подсистем, характеризующих работу электропривода [13].

Также хорошо известно, что упрощение параметров этих связей, даже в рамках одной подсистемы, может существенно повлиять на ход решения задачи, а полученные результаты – отличаться от процессов, происходящих в реальной технической системе.

Поэтому создание динамической модели, наиболее объективно отражающей взаимосвязи параметров всех подсистем электромагнитного привода колебательного движения, является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является создание точной динамической модели одномассовой колебательной системы с электромагнитным приводом, характеризующей различные режимы ее работы и позволяющей производить всесторонний анализ электромеханических процессов методами структурного моделирования.

1. Постановка задачи

Основная сложность при реализации динамических характеристик модели электромагнитного вибратора – точность в определении электромагнитной силы и потокосцепления, которые изменяются во времени и зависят от тока и величины воздушного рабочего зазора.

Использование в качестве исходных данных в виде набора статических параметров потокосцепления и электромагнитного усилия, определяемых аналитическими методами теории магнитных цепей либо по приближенной картине магнитного поля, в полной мере не учитывает локального насыщения участков магнитопровода и потоки рассеяния. Это является главным источником погрешностей расчета динамических характеристик [14].

Для повышения точности воспроизведения динамических характеристик электромагнитного вибратора использовались исходные данные в виде набора статических параметров, полученных с помощью расчета магнитного поля.

Суть данного подхода состоит в том, что на первом этапе с помощью численного метода определяются зависимости электромагнитного усилия и потокосцепления от тока и перемещения подвижной системы, которые затем представляются в виде некоторого массива значений опорных точек статических параметров. На втором этапе полученные массивы значений статических параметров используются при расчете динамических характеристик, а в случае удаления значений от опорных точек интерполируются. Таким образом, задача расчета динамических характеристик сводится к двум этапам решения, что широко используется в практике моделирования электромеханических устройств [14, 15].

2. Динамическая модель и результаты анализа модели

Эскиз однокатушечного электромагнитного привода колебательного движения приведен на рис. 1. Электропривод содержит магнитопровод 1, набранный из листов электротехнической стали, закрепленную на магнитопроводе катушку 2 и установленный в воздушном промежутке, образованном полюсными наконечниками, якорь 3, связанный с системой его возврата в исходное положение. Механи-

ческая система возврата содержит упругий элемент 4 и жестко связанную с якорем присоединенную массу 5.

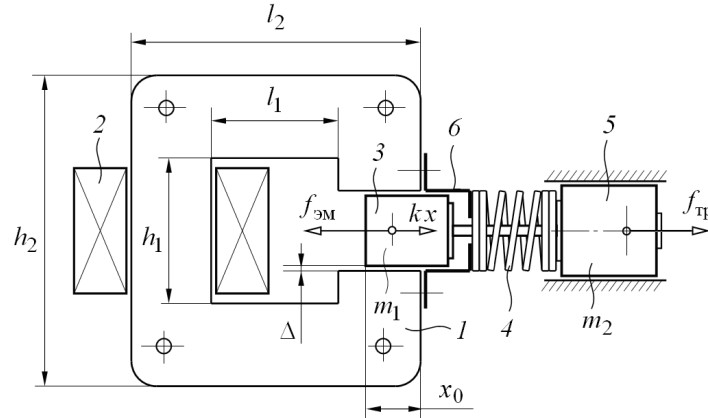


Рис. 1 – Конструкция электромагнитного привода колебательного движения

Fig. 1 – The design of the electromagnetic actuator oscillatory motion

Фиксация начального положения якоря относительно полюсных наконечников обеспечивается фиксирующим устройством 6. Характеристика намагничивания стальных элементов конструкции магнитопровода соответствует свойствам стали марки 1212. На рис. 1 также обозначено направление действия электромагнитной силы $f_{эм}$ при протекании тока по обмотке катушки, противодействующей механической силы упругих связей $f_{п}(x) = kx$ и силы сухого трения $f_{тр}$.

При обесточенной катушке в состоянии покоя механической системы величина x_0 определяет начальную глубину внедрения сердечника якоря относительно полюсных наконечников.

Для упрощения существующего анализа магнитное поле при расчете принимается плоскопараллельным. Также считаем, что в шихтованном магнитопроводе отсутствуют вихревые токи, а потери от гистерезиса, вызванные динамической кривой перемагничивания, минимальны.

В общем случае динамические процессы, протекающие при включении электромагнитного привода, колебательного движения характеризуются системой дифференциальных уравнений, записанных по второму закону Кирхгофа для электрической цепи и по принципу Даламбера для одномассовой механической системы,

$$u(t) = i r + \frac{d\psi(i, x)}{dt}, \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = f_{эм}(i, x) - kx - b_0 \frac{dx}{dt} - f_{тр} \operatorname{sgn} \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

где $u(t)$ – напряжение на обмотке катушки; i – ток катушки; $\psi = \psi(i, x)$ – потокосцепление, зависящее от положения якоря и протекающего тока; r – активное сопротивление катушки; $m = m_1 + m_2$ – масса движущихся частей; m_1 – масса

якоря; m_2 – присоединенная масса; $f_{\text{эм}} = f(i, x)$ – электромагнитная сила, зависящая от положения якоря и протекающего тока; k – коэффициент жесткости упругого элемента (пружины); b_0 – коэффициент вязкого трения упругих связей; $f_{\text{тр}}$ – сила сухого трения.

Для определения статических параметров $\psi(i, x)$ и $f_{\text{эм}}(i, x)$, входящих в уравнение (1), (2), выполнялось решение полевой задачи по расчету магнитного поля в активной зоне электропривода. Численный расчет магнитного поля выполнялся с помощью конечно-элементного моделирования в программе FEMM [16–18]. При двумерной постановке решения задачи по расчету магнитного поля программу отличают простотой в использовании графический интерфейс и доступность [19].

Для визуализации процесса расчета статических параметров в программе на рис. 2 в качестве примера представлены зависимости $\psi = f(i, x)$ (рис. 2, а) и $f_{\text{эм}} = f(i, x)$ (рис. 2, б).

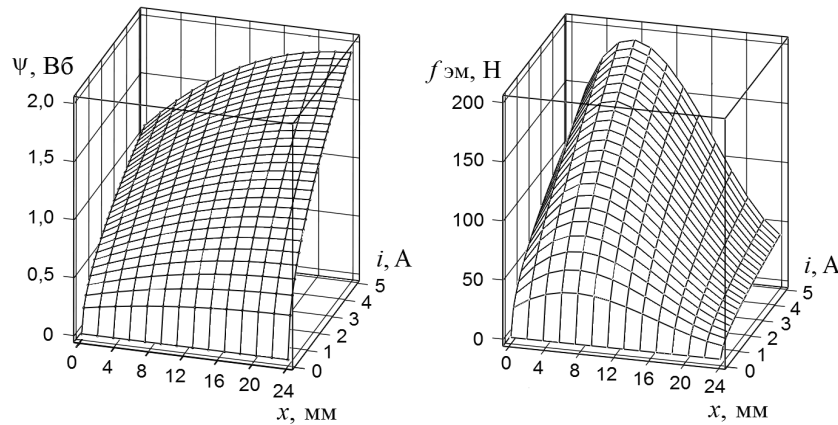


Рис. 2 – Пример расчета статических параметров:

а – потокосцепление $\psi = f(i, x)$; б – электромагнитное усилие $f_{\text{эм}} = f(i, x)$

Fig. 2 – Example of calculation of statistical parameters:

а – linkage $\psi = f(i, x)$; б – electromagnetic force $f_{\text{эм}} = f(i, x)$

На основании уравнений (1) и (2) была разработана динамическая модель одномассовой колебательной системы с электромагнитным приводом. Реализация алгоритма расчета электромеханических процессов выполнена в программе Matlab Simulink. Структурная схема динамической модели в программе Simulink представлена на рис. 3.

Задание функции двух аргументов и интерполяция статических параметров модели $\psi(i, x)$ и $f_{\text{эм}}(i, x)$ в процессе счета осуществляются с помощью блока двумерной таблицы. Детализированная структурная схема механической подсистемы в соответствии с уравнением (2) представлена на рис. 4.

Существенное влияние на динамику электропривода оказывают параметры, учитывающие механические свойства модели. В первую очередь это относится к усилиям, противодействующим движению и зависящим соответственно от перемещения и скорости движения подвижной системы электромагнитного привода.

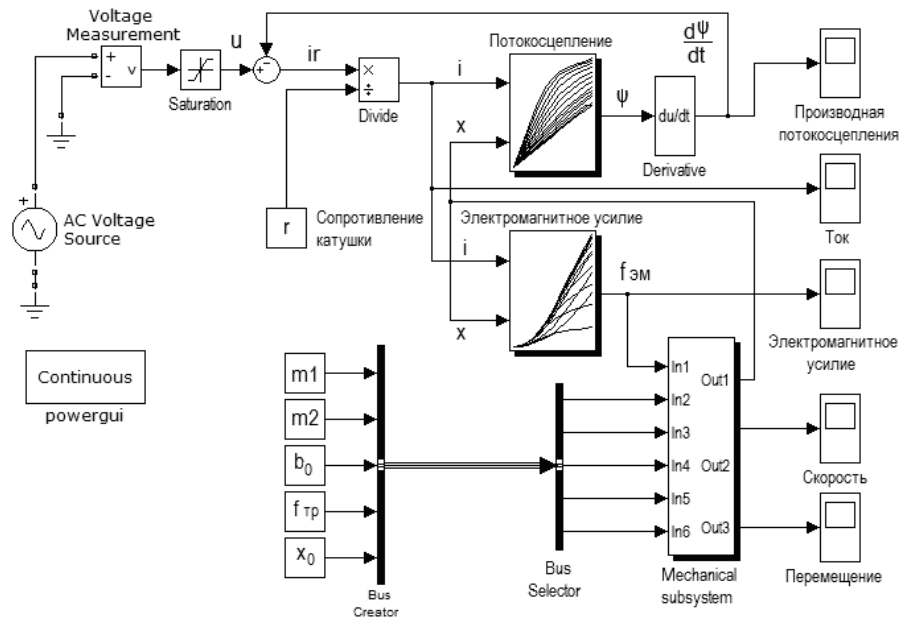


Рис. 3 – Структурная схема динамической модели
Fig. 3 – The block diagram of the dynamic model

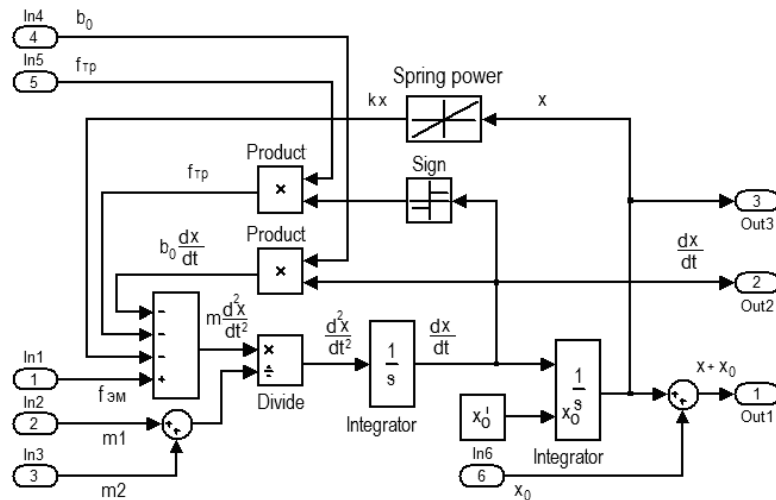


Рис. 4 – Детализированная структурная схема учета механических свойств модели «Mechanical subsystem»

Fig. 4 – Detailed block diagram of a mechanical accounting properties of the model «Mechanical subsystem»

В этой связи для повышения точности расчетов соответствующим образом должны быть отражены математические аналоги механических характеристик модели, согласующие в процессе движения пространственные координаты положения якоря.

3. Учет аналогов механических характеристик модели

В качестве одного из возможных подходов точного учета аналогов механических характеристик следует предварительная оценка некоторых интегральных характеристик сил сопротивления движению в целом при помощи физического эксперимента, которые по мере необходимости используются в виртуальном эксперименте.

В первую очередь этой оценке подвергаются силы трения скольжения (сухого трения) и вязкого трения.

В режиме свободных затухающих колебаний уравнение (2) приводится к виду

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b_0 \frac{dx}{dt} + kx + f_{\text{тр}} \operatorname{sgn} \frac{dx}{dt} = 0, \quad (3)$$

Уравнению (3) будет соответствовать структурная схема динамической модели рис. 3, имеющая аналогичную подсистему «*Mechanical subsystem*» учета механических свойств модели при $f_{\text{эм}} = 0$. В соответствии с уравнением (3) идеализированный характер процесса затухания колебаний от действия только сил трения скольжения при $b_0 = 0$ показан на рис. 5, а. Затухающий процесс от действия только сил вязкого трения при $f_{\text{тр}} = 0$ – на рис. 5, б.

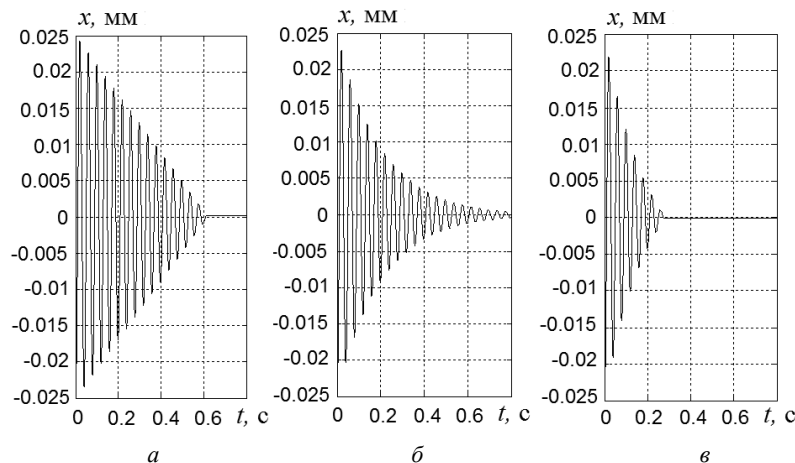


Рис. 5 – Осциллограммы затухающих колебаний механической системы при:
 $k = 12\,500 \text{ Н/м}$; $m = 0,5 \text{ кг}$; $x_0 = 0,025 \text{ м}$:

а – $b = 0$; $f_{\text{тр}} = 10 \text{ Н}$; б – $b = 5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $f_{\text{тр}} = 0$; в – $b = 5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $f_{\text{тр}} = 10 \text{ Н}$

Fig. 5 – Oscillograms damped oscillations of a mechanical system with the:
 $k = 12\,500 \text{ N / m}$; $m = 0,5 \text{ kg}$; $x_0 = 0,025 \text{ m}$:

а – $b = 0$; $f_{\text{тр}} = 10 \text{ Н}$; б – $b = 5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $f_{\text{тр}} = 0$; в – $b = 5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $f_{\text{тр}} = 10 \text{ Н}$

Экспоненциальный характер затухающих колебаний (рис. 5, б) обусловлен тем, что сила вязкого трения пропорциональна скорости. При затухании под действием силы сухого трения максимальные отклонения колебаний убывают по линейному закону, а направление силы противоположно скорости (рис. 5, а).

В рамках идеализированной модели колебательной системы и при учете только одного из преобладающих видов трения расчет процесса затухания может

существенно отличаться от процесса затухания в реальных физических системах, где сухое трение скольжения всегда в большей или меньшей степени сопровождается вязким трением. График затухающих колебаний под действием сил вязкого трения и сил трения скольжения показан на рис. 5, в.

Точное определение параметров связей от действия сил вязкого трения может быть установлено экспериментально на основе исследования затухающего колебательного процесса. При $f_{\text{тр}} = 0$ в такой системе процесс рассеяния (поглощения) энергии происходит только за счет диссипативных сил упругих связей.

При внешнем гармоническом воздействии дифференциальное уравнение, описывающее вынужденные колебания системы с диссипативными силами, пропорциональными скорости движения, может быть представлено в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b_0 \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t ,$$

где F_0 – амплитуда внешней гармонической силы; ω – частота вынужденных колебаний системы.

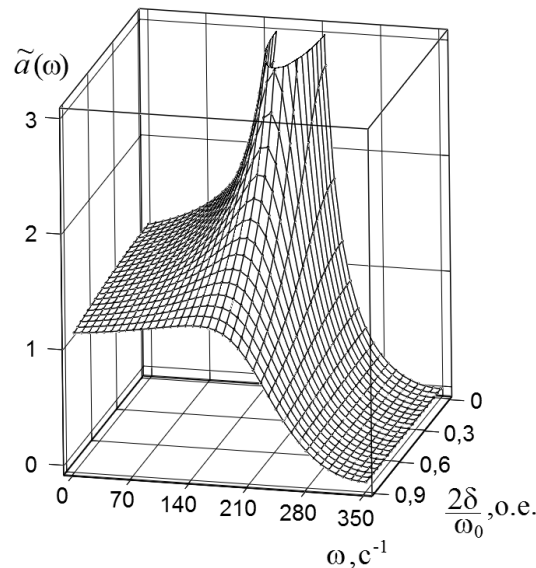


Рис. 6 – Амплитудно-частотная характеристика механической системы $\tilde{a}_0 = f(\omega)$

Fig. 6 – The frequency response of the mechanical system $\tilde{a}_0 = f(\omega)$

Частным решением этого уравнения являются вынужденные колебания $x(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$, зависимость амплитуды которых от частоты (амплитудно-частотная характеристика системы) может быть представлена в известном виде [20]:

$$A_0(\omega) = \frac{F_0}{k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\delta}{\omega_0}\right) \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}},$$

где $\delta = \frac{b_0}{2m}$ – коэффициент затухания; $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – частота собственных колебаний системы без учета потерь энергии.

В относительных единицах

$$\tilde{a}_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\delta}{\omega_0}\right)^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}}.$$

Зависимость $\tilde{a}_0 = f(\omega)$ для частоты собственных колебаний механической системы $\omega_0 = 157 \text{ с}^{-1}$ при различных значениях $2\delta/\omega_0$ приведена на рис. 6. Из графика рис. 6 видно заметное влияние силы вязкого трения в околорезонансной области при $\omega = \omega_0$.

Для верификации модели на рис. 7 и рис. 8 в качестве примера приведены временные диаграммы, полученные с помощью разработанной динамической модели (см. рис. 3).

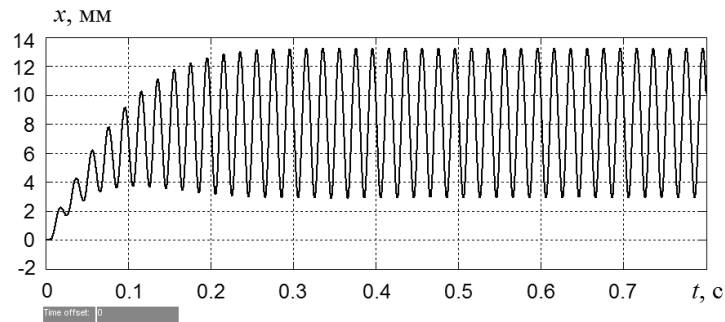


Рис. 7 – Временная диаграмма перемещения якоря $x(t)$

Fig. 7 – Timing diagram move the armature $x(t)$

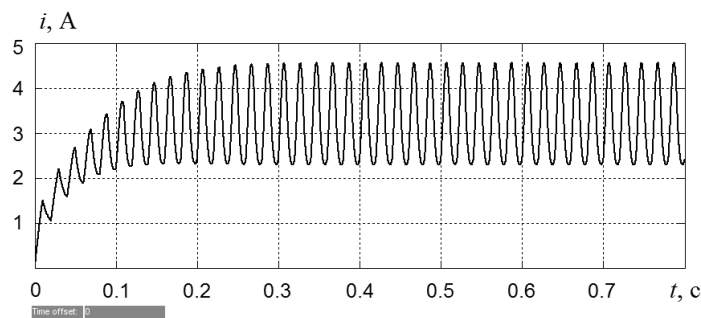


Рис. 8 – Временная диаграмма тока $i(t)$

Fig. 8 – Timing diagram current $i(t)$

Расчеты выполнены для следующих параметров модели: $U_m = 55 \text{ В}$; $m = 0,25 \text{ кг}$; $r = 8,2 \text{ Ом}$; $b_0 = 5 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$; $f_{\text{тр}} = 4 \text{ Н}$; $k = 12500 \text{ Н} / \text{м}$. Линейные

размеры магнитопровода: $l_1 = 45$ мм; $l_2 = 95$ мм; $h_1 = 46$ мм; $h_2 = 96$ мм; толщина стального пакета пластин $L = 30$ мм. Статические параметры системы соответствуют графикам на рис. 2. Начальная глубина внедрения якоря $x_0 = 0$ (см. рис. 1).

При сравнении полученных зависимостей с экспериментальными было выявлено хорошее соответствие качественных и количественных показателей только в случае точного учета аналогов механических характеристик модели. Расхождению расчетных характеристик по перемещению и току с экспериментальными данными соответствуют погрешности 5–8 %, что является общепринятыми значениями.

Следует отметить, что, как правило, силами сопротивления, зависящими от скорости движения, часто пренебрегают. Всесторонний анализ модели (рис. 3) показывает, что имеющиеся место допущения позволяют получать скорее качественные, чем количественные результаты.

Выводы

1. Разработанную динамическую модель можно эффективно использовать для исследования электромеханических процессов, а также при анализе и синтезе управления электромагнитными вибрационными приводами вибротехнологических установок методами структурного моделирования.

2. Представленный алгоритм электромагнитного расчета и вариант схемной реализации структурной динамической модели позволяют учесть насыщение и потоки рассеяния, возникающие в массивном магнитопроводе. Установленная совокупность взаимосвязанных электромагнитных и механических величин позволяет достаточно просто варьировать значительным набором входных параметров и производить исследования рабочих режимов как в установившихся, так и в переходных нестационарных режимах с большим без ограничений набором выходных переменных, а также их интегральных параметров.

3. Точность при динамических расчетах в существенной степени зависит от точности воспроизведения математических аналогов механических характеристик. В особенности это касается учета процессов, связанных с рассеянием энергии, как за счет собственных демпфирующих свойств отдельных звеньев и упругих связей, зависящих от скорости движения, так и за счет сил сухого трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pevchev V.P.** Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator // *Journal of Mining Science*. – 2009. – Vol. 45, no. 4. – P. 372–381.
2. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
3. **Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки*. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
4. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // *Электротехника*. – 2014. – № 12. – С. 45–49.
5. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
6. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во Тольятт. гос. ун-та, 2012. – 142 с.
7. **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.

8. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. Сравнение геометрически подобных систем электромагнитов по условию постоянства теплового критерия // Электротехника. – 2011. – № 12. – С. 14а–16.
9. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50а–53.
10. Нейман Л.А., Скотников А.А., Нейман В.Ю. Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 50–54.
11. Нейман Л.А., Петрова А.А., Нейман В.Ю. К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 62–64.
12. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
13. Ивашин В.В., Певчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 42–46.
14. Расчет динамики включения электромагнита постоянного тока / Ю.А. Бахвалов, Б.Н. Лобов, Г.В. Могилевский, А.Г. Никитенко // Электротехника. – 1982. – № 1. – С. 48–51.
15. Пеккер И.И., Никитенко А.Г. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. – М.: Энергия, 1967. – 168 с.
16. Нейман В.Ю., Петрова А.А. Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (52). – С. 101–108.
17. 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.
18. 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.
19. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
20. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.

OSCILLATORY MOTION ELECTROMAGNETIC DRIVE DYNAMIC MODEL FOR LOW-FREQUENCY VIBRATION GENERATION SYSTEMS

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Oscillatory motion linear electromagnetic drives investigation is necessary to improve their dynamic design accuracy. Such drives are applied in engineering systems to generate vibrations at frequency 100 Hz. The dynamical model of a single-mass oscillatory system with an electromagnetic drive has been created. Such system model describes different operating modes of the drives and permits to analyze fundamentally electromechanical processes by means of structured modeling methods. Field effects in the considered problem have been simulated by the standard finite-element FEMM software. Dynamical behavior of the drive have been calculated by the algorithm implemented with structured modeling in Matlab Simulink. The paper states the complex approach to oscillatory motion electromagnetic drive dynamical model creation. The dynamical model is based on differential equations for non-linear circuit electrical balance and for mechanical system with respect to D'Alembert principle. The calculation algorithm and model scheme

implementation with help of structured modeling has been proposed. This algorithm allows to take into account saturation and leakage fluxes in the steel magnetic core. It has been shown that dynamic design accuracy significantly depends on mechanical characteristics mathematical representation. The great attention is focused on determination and taking into account elastic links and dry friction forces. Operating models fundamental analysis is made as an example of electromagnetic drive single-mass oscillatory system periodic electromechanical processes calculation. The investigations made has provided recommendations for electromechanical processes calculation accuracy improvement.

Keywords: vibration technologies, electromagnetic drive, dynamical model, finite-element simulation, single-mass oscillatory system, structured modeling methods.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-75-87

REFERENCES

1. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 372–381.
2. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privody dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drives for impulse and vibroimpulse technologies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
3. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivy razvitiya silovykh elektromagnitnykh impul'snykh sistem [Prospects of electromagnetic pulse of power systems]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Kurgan State University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 29, pp. 88–90.
4. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Lineinye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny dlya nizkochastotnykh udarnykh tekhnologii [Linear synchronous electromagnetic machines for low-frequency impact technologies]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 45–49. (In Russian)
5. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Nizkochastotnye udarnye elektromagnitnye mashiny i tekhnologii [Low-frequency impact electromagnetic machines and technologies]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no.1, pp. 256–259.
6. Pevchev V.P., Ivashin V.V. Proektirovanie moshchnykh korotkikhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigatelei [Designing powerful pulsed electromagnetic short-stroke engine]. *Tol'yatti, Tol'yatinskii gosudarstvennyi universitet Publ.*, 2012. 142 p.
7. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Uproshchenniy raschet elektromagnitnogo udarnogo privoda v povtorno-kratkovremennom rezhime raboty [A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 50–53. (In Russian)
8. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Sravnenie geometricheski podobnykh sistem elektromagnitov po usloviyu postoyanstva teplovogo kriteriya [Comparison of geometrically similar electromagnet systems by means of the constancy condition of heat criterion]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2011, no. 12, pp. 14a–16.
9. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. K voprosu ucheta glavnykh razmerov pri vybere tipa elektromagnita po znacheniyu konstruktivnogo faktora [On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2011, no. 6, pp. 50a–53. (In Russian)
10. Neyman L.A., Skotnikov A.A., Neyman V.Yu. Issledovaniye nagreva elektromagnitnogo dvigatelya v perekhodnykh rezhimakh [Electromagnetic motor heating transient analysis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 6, pp. 50–54.
11. Neyman L.A., Petrova A.A., Neyman V.Yu. K otsenke vybora tipa elektromagnita po znacheniyu konstruktivnogo faktora [On the electromagnet type selection by a design factor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 6, pp. 62–64.

12. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika [Operation cycle of double winding synchronous electromagnetic machine with head free running out]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 48–52.
13. Ivashin V.V., Pevchev V.P. Osobennosti dinamiki raboty i energeticheskikh diagramm impul'snogo elektromagnitnogo privoda pri parallel'nom i posledovatel'nom soedinenii obmotok возбуждения [Specifics of running dynamics and energy diagrams of a pulse electromagnetic drive with shunt- and cascade-connected excitation windings]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 6, pp. 42–46. (In Russian)
14. Bakhvalov Yu.A., Lobov B.N., Mogilevskii G.V., Nikitenko A.G. Raschet dinamiki vkluyeniya elektromagnita postoyannogo toka [Calculation of the dynamics of the inclusion of the electromagnet DC]. *Elektrotehnika – Soviet Electrical Engineering*, 1982, no. 1, pp. 48–51. (In Russian)
15. Pekker I.I., Nikitenko A.G. *Raschet elektromagnitnykh mekhanizmov na vychislitel'nykh mashinakh* [Calculation of electromagnetic mechanisms on computers]. Moscow, Energiya Publ., 1967. 168 p.
16. Neyman V.Yu., Petrova A.A. Modelirovanie v FEMM magnitnogo polya dlya rascheta tyagovykh kharakteristik elektromagnitnykh dvigatelei postoyannogo toka [Magnetic field simulation in FEMM for calculating the traction characteristics of electromagnetic DC motors]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 2 (52), pp. 101–108.
17. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Raschet pokazatelya ekonomichnosti silovogo elektromagnita postoyannogo toka s pomoshch'yu modelirovaniya magnitnogo polya [Calculation of economy index of D.C. power electromagnet using electromagnetic field simulation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2008, no. 6, pp. 21–24.
18. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primenenie metoda provodimosti dlya ucheta sily odностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита [Conductivities method application for accounting asymmetrical electromagnet single-side magnetic attraction force]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 214–218.
19. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Methods for calculating the magnetic systems of electrical devices: magnetic circuit, the field and the program FEMM]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p.
20. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoi teorii kolebaniy i udara* [Fundamentals of applied theory of vibrations and shock]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 320 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и технологии. Опубликовано более 70 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna (b. 1966) – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Electrotechnological Units Department of the Novosibirsk State Technical University. Research interests: linear synchronous electromagnetic machine and technology. She is author of 70 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: neyman31@gmail.com).



Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Автор и соавтор более 200 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich – was (b. 1960), Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theory of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. Research interests – power electromagnetic pulse systems. Author and co-author of over 200 scientific and educational works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: nv.nstu@ngs.ru).

*Статья поступила 25 июня 2015 г.
Received June 25, 2015*

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Dinamicheskaya model' elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya dlya sistem generirovaniya nizkochastotnykh vibratsii [Oscillatory motion electromagnetic drive dynamic model for low-frequency vibration generation systems], *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 75-87. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-75-87