

УДК 621.313.3:621.318.3

**А.А. Черно, А.П. Гуров, кандидаты техн. наук,  
А.С. Минчула, Д.Л. Безверхний**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРИВОДАХ ВИБРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК**

*Аннотация.* Разработана динамическая модель трехмассовой колебательной системы с энергосберегающим электромагнитным приводом. Основу модели составляют дифференциальные уравнения, описывающие механические взаимодействия подвижных масс, а также массив значений потокосцепления и электромагнитной силы, которые были рассчитаны методом конечных элементов при варьировании величинами магнитодвижущей силы и воздушного зазора.

**О. О. Черно, А. П. Гуров., кандидаты технических наук  
О. С. Минчула, Д. Л. Безверхний**

### **МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИВОДАХ ВІБРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК**

*Аннотація.* Розроблено динамічну модель тримасової коливальної системи з енергозберігаючим електромагнітним приводом. Основу моделі складають диференціальні рівняння, що описують механічні взаємодії рухомих мас, а також масив значень потокосцеплення та електромагнітної сили, які були розраховані методом кінцевих елементів при варіюванні величинами магніторушійної сили та повітряного проміжку.

**A.A. Chernov, A. P. Gurov, PhD  
A.S. Minchula, D.L. Bezverhniy**

### **MODELING ELECTROMECHANICAL PROCESSES IN ENERGY-SAVING ELECTROMAGNETIC DRIVES VIBRATORY SETTINGS**

*Abstract.* The dynamic model of the three-mass oscillating system with an energy-saving electromagnetic drive has been worked out. The model is based on differential equations, describing mechanical the movable masses interactions, and the array of flux linkage and electromagnetic force values, which were computed by the finite-element method for different values of magnetomotive force and air-gap.

Вибрационный электропривод широко применяется в промышленности для обеспечения многих технологических процессов и является мощным потребителем электроэнергии. Поэтому множество научных работ посвящено снижению энергопотребления вибрационных электроприводов [1-3]. Одним из перспективных направлений исследований в данной области является создание энергосберегающих приводов на основе электромагнитных вибраторов, работающих в резонансном или околорезонансном режиме. Механическая система этих приводов построена таким образом, что они обеспечивают достаточную амплитуду колебаний рабочего органа виброустановки при небольших относительных колебаниях якоря и сердечника электромагнита. Это позволяет делать минимальной величину воздушного зазора и обеспечивать наибольшую электромагнитную силу при наименьших потерях энергии [3]. Сегодня можно выделить три основных способа построения механической системы энергосберегающих электромагнитных виброприводов: использование синфазного движения якоря и сердечника электромагнита [3], использование эффекта рычага [2] и применение динамического виброгасителя для стабилизации промежуточной платформы (рис.1) [1]. Во всех трех случаях используются трехмассовые колебательные системы.

© Черно А.А., Гуров А.П., Минчула А.С.,  
Безверхний Д.Л., 2011

Применение любого из перечисленных способов обеспечивает эффективную работу при небольшом энергопотреблении только при условии рационального выбора параметров сердечника, якоря и обмотки электромагнита. Для этого необходимо, чтобы на стадии проектирования разработчик мог, варьируя параметрами электромагнитов, рассчитывать в динамическом режиме ток, электромагнитную силу, перемещение подвижных масс, потребляемую и полезную мощность, а также другие величины, характеризующие работу привода. Поэтому, моделирование электромеханических процессов в энергосберегающих электромагнитных виброприводах является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка динамической модели трехмассовой колебательной системы с энергосберегающим электромагнитным приводом.

Основная трудность, возникающая при составлении математической модели электромагнитного вибрационного привода, заключается в определении электромагнитной силы и потокосцепления, изменяющихся во времени по мере изменения тока в обмотке и величины воздушного зазора. В работе [2] для описания электромагнитных процессов применяются аналитические зависимости, составленные на основании модифицированного метода вероятных путей замыкания потока, формулы Максвелла для вычисления электромагнитной силы и аппроксимации кривой на-

магничивания стали. Данные зависимости являются весьма приближенными и не учитывают потоки рассеяния и локальные насыщения сердечника и якоря.

Более точное описание электромагнитных процессов обеспечивают численные методы, такие как метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод вторичных источников и многие другие. Но применение любого из этих методов совместно с расчетом динамики трехмассовой колебательной системы приведет к неоправданно большому объему вычислений: численный расчет магнитного поля для одного положения якоря занимает порядка 1 ч (с помощью четырехядерного процессора с тактовой частотой 2,8 ГГц), а для моделирования динамики колебательной системы требуется порядка  $10^5$  таких расчетов.

Поэтому, наиболее целесообразным является подход, предложенный в [4] для моделирования динамики линейного электродвигателя. Данный подход состоит в том, что сначала с помощью численного метода рассчитываются сила и потокосцепление для ряда значений МДС обмотки и перемещения якоря в статике, а затем полученные массивы значений интерполируются и используются при расчете динамики. Использование такого подхода позволит создать динамическую модель, наиболее точно описывающую электромеханические процессы в электромагнитном вибрационном приводе.

Рассмотрим колебательную систему с динамическим виброгасителем на промежуточной платформе (рис.1).

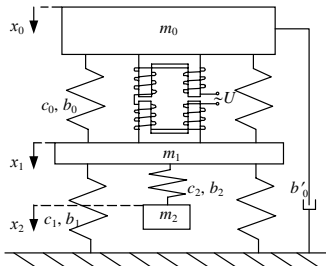


Рис.1. Динамическая схема виброустановки с электромагнитным приводом и динамическим виброгасителем на промежуточной платформе

Динамика трехмассовой системы описывается следующими уравнениями:

$$m_0 \frac{d^2 x_0}{dt^2} + b_0 \left( \frac{dx_0}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + b'_0 \frac{dx_0}{dt} + c_0 (x_0(t) - x_1(t)) = F(t); \quad (1)$$

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_0 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_0}{dt} \right) + b_1 \frac{dx_1}{dt} + b_2 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_0 (x_1(t) - x_0(t)) + c_1 x_1(t) + c_2 (x_1(t) - x_2(t)) = -F(t); \quad (2)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + c_2 (x_2(t) - x_1(t)) = 0, \quad (3)$$

где  $F$  – сила, создаваемая электромагнитами;  $m_0, x_0; m_1, x_1; m_2, x_2$  – массы и координаты перемещения ра-

бочего органа, промежуточной платформы и динамического виброгасителя соответственно;  $c_0, b_0; c_1, b_1$  и  $c_2, b_2$  – жесткости и коэффициенты вязкого трения упругих связей;  $b'_0$  – коэффициент диссипации энергии в обрабатываемом материале.

Сила  $F$  изменяется во времени по мере изменения МДС обмотки  $IW$  и величины воздушного зазора  $\delta$ . МДС обмотки

$$IW(t) = \frac{W}{R} \left( U(t) - \frac{d\psi}{dt} \right), \quad (4)$$

где  $R$  и  $W$  – активное сопротивление и число витков обмотки;  $U$  – входное напряжение;  $\psi$  – потокосцепление. Воздушный зазор

$$\delta(t) = \delta_0 + x_1(t) - x_0(t), \quad (5)$$

где  $\delta_0$  – величина зазора в положении равновесия.

Потокосцепление  $\psi$  и силу  $F$ , можно представить как функции двух переменных:  $IW$  и  $\delta$ . Для их определения составим расчетную модель в программе "Maxwell" (рис.2).

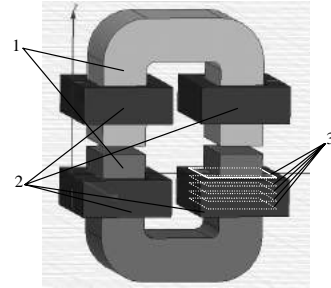


Рис.2. Модель для расчета магнитного поля в программе "Maxwell":

- 1 – сердечники электромагнита;
- 2 – четырехсекционная обмотка; 3 – контуры для расчета потокосцепления

С помощью данной программы при варьировании величинами  $IW$  и  $\delta$  были определены значения силы  $F$  и магнитных потоков  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ , проходящих через контуры среднего витка обмотки на разных уровнях (рис.2), где  $n$  – число контуров. Потокосцепление  $\psi$  определяется как произведение среднего потока  $\Phi_{cp}$  и числа витков обмотки  $W$ , где

$$\Phi_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_i.$$

На основании полученных массивов значений  $\Phi_{cp}(IW, \delta)$  и  $F(IW, \delta)$ , а также уравнений (1) – (5) была создана динамическая модель трехмассовой колебательной системы с электромагнитным приводом в программе "Simulink" (рис.3). Интерполяция функций  $\Phi_{cp}(IW, \delta)$  и  $F(IW, \delta)$  в данной модели осуществляется с помощью кубических сплайнов в блоках "Magnetic flux" и "Magnetic force".

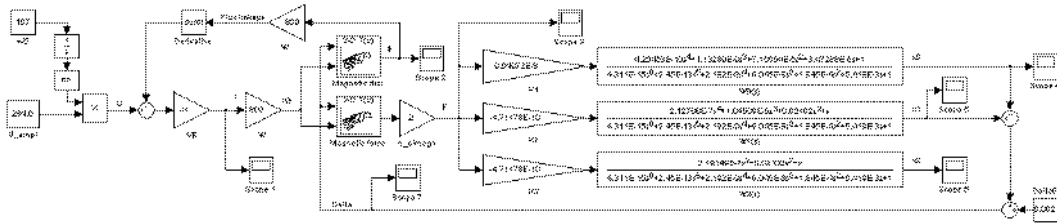


Рис.3. Динамическая модель в программе "Simulink"

На рис.4 приведены временные диаграммы, полученные с помощью разработанной динамической модели. Входным сигналом является синусоидальное напряжение амплитудой 284,6 В и частотой 25 Гц, которое подается на обмотки двух идентичных электромагнитных вибраторов.

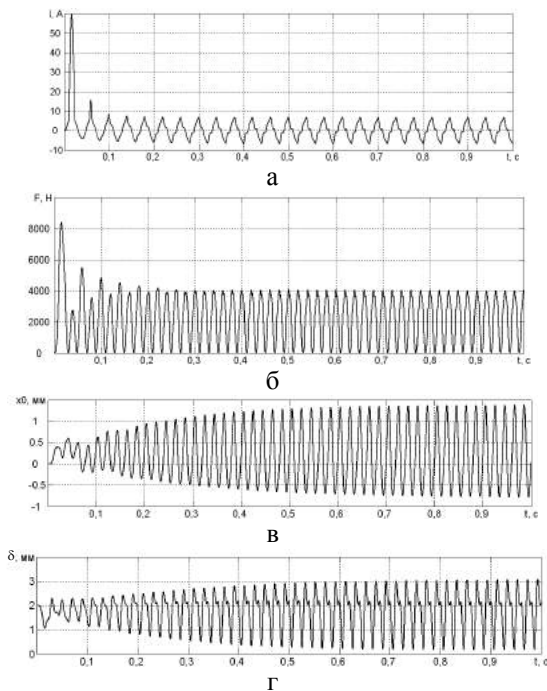


Рис.4. Временные диаграммы:

а – ток; б – электромагнитная сила; в – перемещение рабочего органа; г – величина воздушного зазора

Полученные диаграммы позволяют наблюдать следующие явления:

- в установившемся режиме изменение во времени исследуемых величин носит несинусоидальный характер, что обусловлено существенной нелинейностью магнитной системы;
- в начале переходного процесса ток достигает значения, на порядок превышающего номинальное, что обусловлено насыщением стали электромагнитов;
- несинусоидальность колебаний оказывает существенное влияние на минимальную величину воздушного зазора.

Разработанная динамическая модель и полученные с ее помощью результаты открывают перспективу дальнейших исследований электромеханических процессов в энергосберегающих электромагнитных вибрационных приводах с целью улучшения их характеристик.

Список использованной литературы

1. Гуров А.П. Резонансные вибрационные машины с системой управляемой виброзащиты /А.П. Гуров., А.А Черно // *Вібрації в техніці та технологіях.* – 2007. – №1(46). – С. 43-44.
2. Гуров А.П. Энергосберегающий вибрационный привод на основе электромагнитного вибратора с реактивными массами / А.П. Гуров, А.А Черно // *Вісн. Кременчужького держ. ун-ту ім. М. Остроградського.* – 2010. – Вип. 3. – Ч. 2. – С. 86-89.
3. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2008. – 324 с.
4. Милых В.И. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потока сцепления / В.И.Милых, С.В.Ткаченко // *Вісн. Кременчужького держ. ун-ту ім. М. Остроградського.* – 2010. – Вип. 3. – Ч. 2. – С. 70-73.

Получено 09.07.2011



**Черно**  
 Александр Александрович,  
 доц. каф. компьютеризованных систем  
 управления Нац. ун-та кораблестроения  
 им. адм. Макарова,  
 54025, г. Николаев, просп.  
 Героев Сталинграда 11, кв. 317,  
 т. (068) 267-34-28,  
 e-mail: [AlexTcherno@yandex.ru](mailto:AlexTcherno@yandex.ru)



**Гуров**  
 Анатолий Петрович,  
 проф. каф. автоматики Нац. ун-та кораблестроения  
 им. адм. Макарова,  
 54010,г. Николаев,  
 ул. Карпенко 75, кв. 60,  
 т. (0512) 44-15-84,  
 e-mail: [Angur45@mail.ru](mailto:Angur45@mail.ru)



**Минчула**  
 Александр Сергеевич,  
 студент Нац. ун-та кораблестроения им.  
 адм. Макарова, г. Николаев, ул. Фонтанная  
 166, 54051, т. (0512) 60-02-10



**Безверхний**  
 Дмитрий Леонидович,  
 студент Нац. ун-та кораблестроения им.  
 адм. Макарова, г. Николаев,  
 т. (0512) 41-92-24,  
 e-mail: [Damial@list.ru](mailto:Damial@list.ru)