

УДК 621.313

**Д.А. Семенец, Н.Я. Шевченко (канд. техн. наук)**Учебно-научный профессионально-педагогический институт УИПА, г. Артемовск  
кафедра электромеханических систем**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

*В работе представлены расчетные соотношения и математическая модель линейного индукционно-динамического преобразователя для режима микроперемещений, на основании которых разработана компьютерная модель ЛИДП. На основании полученной модели определены регулировочные характеристики и проведен анализ типов управляющих воздействий для преобразователя.*

**Ключевые слова:** *привод микроперемещений, линейный индукционно-динамический преобразователь, компьютерная модель, регулировочные характеристики.*

**Актуальность**

При разработке систем автоматического управления различного уровня актуальной задачей является развитие и совершенствование элементной базы электромеханических систем. Для решения задач обеспечения перемещений в микрометровом диапазоне требуются совершенно новые технологии и технические средства. Самой актуальной проблемой является обеспечение оптимальных динамических параметров приводов и повышение точности позиционирования. Попытки решения данной проблемы с помощью распространенных электромеханических систем наталкиваются на целый ряд технических трудностей. Традиционные электромашиные исполнительные устройства в данном направлении исчерпали свои возможности и необходим переход на другой технологический уровень с применением новых материалов, иных физических эффектов и конструктивных решений.

В настоящее время ведутся исследования и разработки исполнительных устройств нового типа. Это магнитоэлектрические, пьезоэлектрические, электромагнитные и другие преобразовательные устройства. Перспективным типом устройств для линейных перемещений являются линейные индукционно-динамические преобразователи (ЛИДП). Их принцип действия и основные характеристики достаточно полно описаны в работах [1], [2], однако основной акцент сделан на силовых устройствах ударного действия. При использовании данных устройств в режиме точного позиционирования возникает необходимость математического описания и компьютерного моделирования процессов в ЛИДП. В статье проанализированы основные характеристики преобразователя и предложена компьютерная модель ЛИДП в режиме микроперемещений.

**Постановка задачи**

Основной задачей работы является разработка компьютерной модели линейного индукционно-динамического преобразователя и анализ регулировочных характеристик ЛИДП в режиме малых перемещений.

**Решение задачи**

Линейный индукционно динамический преобразователь – электромеханический преобразователь, предназначенный для позиционирования подвижного якоря с рабочим органом (рис. 1).

В дальнейшем ЛИДП рассмотрен как система взаимосвязанных компонентов: упругой механической части (подвижного якоря – рабочего органа), приводимого в движение электромагнитной силой, развиваемой плоской катушкой короткозамкнутого якоря, жестко соединенной с рабочим органом, движущейся в магнитном поле индуктора. Катушка индуктора возбуждается периодическими прямоугольными импульсами с амплитудой  $U_y$ , частотой  $f_y$ , скважностью  $q$ .

Полученная в [3] передаточная функция ЛИДП позволяет исследовать динамические процессы в приводе при рассмотрении последнего линейной стационарной системой. Передаточная функция описывает поведение системы в терминах вход-выход и не несет никакой информации о внутренних переменных и характере их изменения. Для расширения возможностей исследования процессов в приводе микроперемещений, анализа различных управляющих воздействий разработана имитационная модель ЛИДП в среде «MATLAB - Simulink».

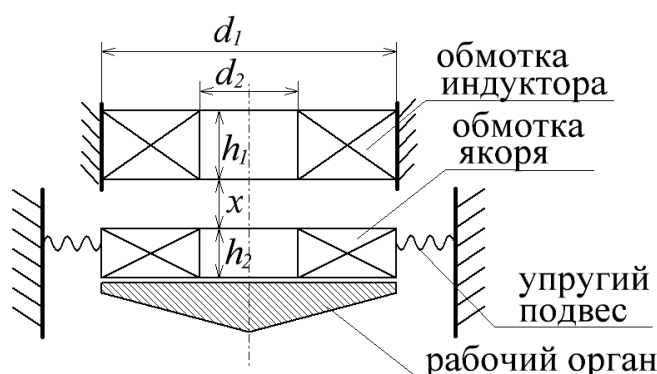


Рисунок 1 – Конструкция и геометрические размеры ЛИДП

Компьютерная модель разработана на основании системы дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические процессы в преобразователе.

$$f(t) = i_1(t)i_2(t) \frac{dM_{12}(x)}{dx} = m \frac{dV(t)}{dt} + Kx(t) + BV(t); \quad (1)$$

$$i_1(t)[R_1(t) + R_K] + (L_K + L_1) \frac{di_1(t)}{dt} + M_{12}(x) \frac{di_2(t)}{dt} + i_2(t) \cdot V(t) \frac{dM_{12}(x)}{dx} = U_o(t); \quad (2)$$

$$L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + M_{12}(x) \frac{di_1(t)}{dt} + i_1(t) \cdot V(t) \frac{dM_{12}(x)}{dx} + i_2(t)R_2(t) = 0. \quad (3)$$

где  $U_y(t)$  – амплитуда напряжения возбуждения индуктора;  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  – токи в обмотках индуктора и якоря соответственно;  $L_K$ ,  $R_K$  внутренние индуктивность и сопротивление коммутационного устройства;  $L_1$ ,  $R_1$  – индуктивность и сопротивление обмотки индуктора;  $L_2$ ,  $R_2$  внутренние индуктивность и сопротивление короткозамкнутой обмотки якоря;  $M_{12}(x)$  – взаимная индуктивность обмоток индуктора и якоря;  $m$  – масса якоря и рабочего органа;  $K$  – коэффициент упругости подвеса;  $B$  – коэффициент динамического трения;  $x(t)$  – величина перемещения якоря.

Конструктивные параметры и способы выполнения обмоток индуктора и якоря ЛИДП зависят от особенностей исполнения привода микроперемещений. С целью обеспечения высокой эффективности и быстродействия ЛИДП использованы соотношения геометрических размеров электроиндукционной системы, предложенные в [2]. Основные геометрические размеры катушки представлены на рис. 1.

Базовыми приняты рекомендованные соотношения относительного диаметра

$d^* = (d_1 - d_2)/(d_1 + d_2) = 0,7$  и высоты катушки  $k_h = h/(d_1 - d_2)$ , причем для неподвижной катушки индуктора  $k_h = 0,20$ , для подвижной катушки якоря  $k_h = 0,05$ .

На основании этого, принято соотношение диаметров  $d_2 = 0,18d_1$ , средний диаметр витка  $d = 0,5(d_1 + d_2) = 0,59d_1$ , средняя длина витка  $l_B = 0,59\pi d_1$ . Высота намотки катушки индуктора  $h_1 = 0,164d_1$ .

Количество витков катушки:

$$w_1 = \frac{k_Y S_O}{S_M}, \quad (4)$$

где  $k_Y$  - коэффициент укладки,  $S_M$  - сечение обмоточного провода диаметром  $d_M$  и удельной проводимостью  $\rho$ ,  $S_O$  - площадь окна намотки катушки.

$$S_O = r \cdot h = 0,5(d_1 - d_2) \cdot h = 0,41d_1 \cdot 0,164d_1 = 0,06724d_1^2.$$

$$w_1 = \frac{k_Y 0,27d_1^2}{\pi d_M^2} = 0,0859k_Y \left( \frac{d_1}{d_M} \right)^2. \quad (5)$$

С достаточной для инженерных расчетов точностью индуктивность обмотки определяется в соответствии с соотношением [2]:

$$L_1 = 3,75 \cdot 10^{-7} w_1^2 (d_1 + d_2)^{1,4} (d_1 - d_2)^{-0,4}. \quad (6)$$

При учете принятых конструктивных соотношений:

$$L_1 = 3,777 \cdot 10^{-9} k_Y^2 \frac{d_1^5}{d_M^4}. \quad (7)$$

Активное сопротивление обмотки:

$$R_1 = \frac{w_1 l_B \rho}{S_M} = k_Y \rho \frac{0,203d_1^3}{d_M^4}. \quad (8)$$

Аналогично, определены параметры якоря.

Количество витков короткозамкнутой катушки якоря:

$$w_2 = 0,0214k_Y \left( \frac{d_1}{d_M} \right)^2. \quad (9)$$

Индуктивность обмотки якоря:

$$L_2 = 5,12 \cdot 10^{-7} w_2^2 d_1. \quad (10)$$

Активное сопротивление обмотки якоря:

$$R_2 = \frac{w_2 l_B \rho}{S_M} = 0,0505k_Y \rho \frac{d_1^3}{d_M^4}. \quad (11)$$

Разработанная компьютерная модель для моделирования в среде «MATLAB - Simulink» представлена на рис. 2.

При дальнейшем моделировании использованы параметры ЛИДП, определенные в соответствии с (4) – (11) для внешнего диаметра индуктора  $d_1 = 12$  мм: число витков катушек индуктора, якоря  $w_1 = 600$ ;  $w_2 = 150$ ; сопротивление катушки индуктора  $R_1 = 35,6$  Ом; сопротивление катушки якоря  $R_2 = 13,4$  Ом; индуктивность катушек  $L_1 = 2,97$  мГн;  $L_2 = 1,37$  мГн; начальное значение взаимной индуктивности –  $M_0 = 3,32$  мГн; коэффициент снижения взаимной индуктивности  $k_M = -1,5$ ; масса якоря с подвижным электродом  $m =$

$3,92 \times 10^{-6}$  кг; коэффициент упругости механической части  $K = 0,1$  м/Н; коэффициент динамического трения  $B = 0,001$ .

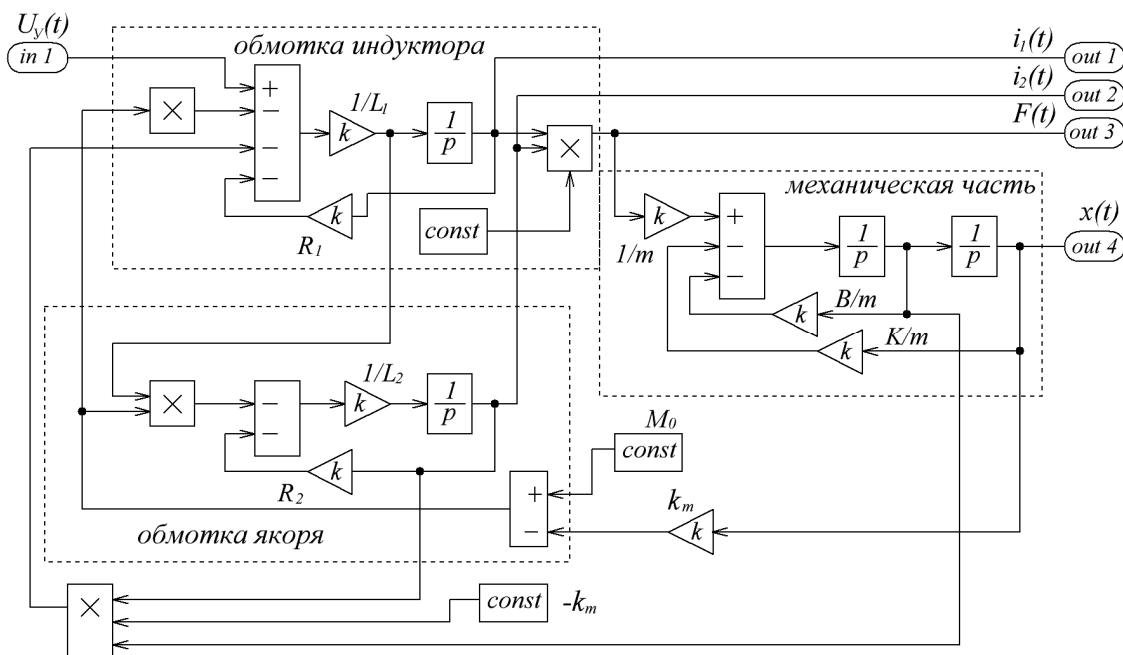


Рисунок 2 – Компьютерная модель ЛИДП

Учитывая то, управление ЛИДП возможно осуществлять вариацией трех переменных – амплитуды управляющего импульса, его частоты и скважности, представляет интерес выбор оптимального закона управления перемещением рабочего органа с точки зрения быстрейшего, качества регулирования и линейности характеристики управления.

Разработанная модель позволяет исследовать как динамические (временные) характеристики установления перемещения, так и статические – регулировочные характеристики преобразователя. Возможен анализ величин токов в обмотках индуктора и якоря, механических усилий в упругом подвесе преобразователя. На рис. 3,4 показаны характеристики управления ЛИДП – зависимости величины перемещения рабочего органа при различных величинах амплитуды управляющего импульса и его частоты.

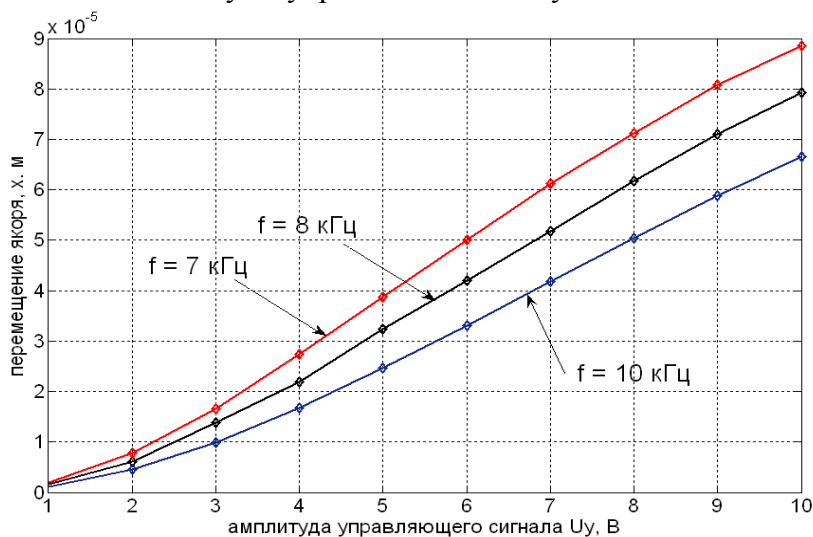


Рисунок 3 – Регулировочные характеристики ЛИДП  $x = F(U_0)$  при различных частотах управляющего сигнала

Полученные результаты моделирования показывают возможность получения высокой линейности регулировочных характеристик при использовании амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) управляющего сигнала для получения больших перемещений и частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) для получения малых перемещений. Установление частоты при АИМ с амплитудой управляющего сигнала более 10 В сопровождается значительным перерегулированием ( $\sigma > 30\%$ ).

Широтно-импульсная модуляция эффективна при значениях скважности в пределах  $q = 5 \dots 3$ , дальнейшее снижение скважности приводит к значительному перерегулированию выходного сигнала, при значениях  $q < 2$  выходной сигнал снижается.

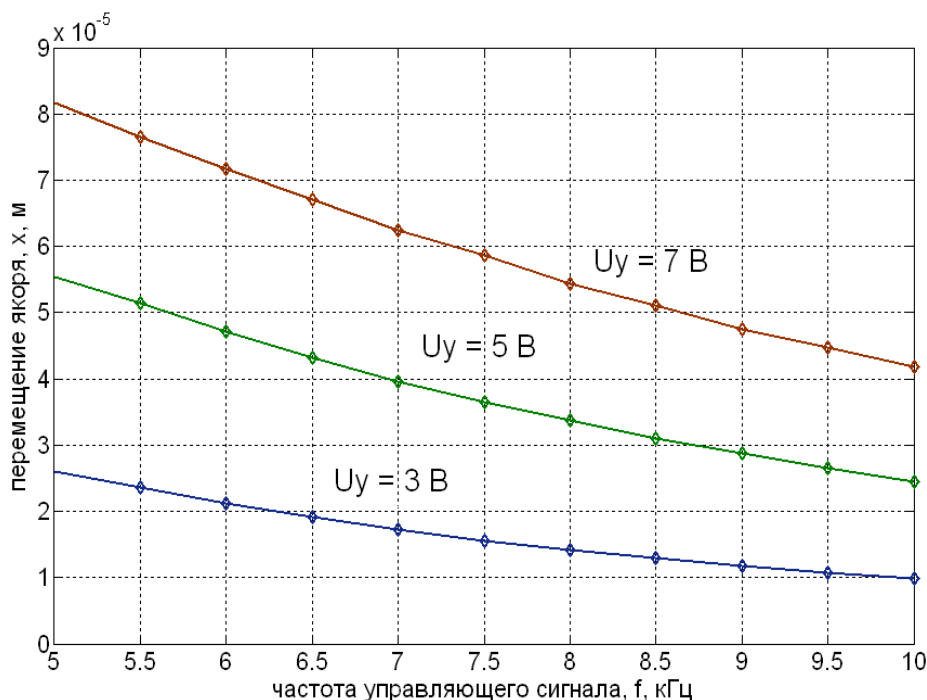


Рисунок 4 – Регулировочные характеристики ЛИДП  $x = F(f_{\delta})$  при различных амплитудах управляющего сигнала

### Выводы и пути дальнейших исследований

1. Разработана компьютерная модель линейного индукционно-динамического преобразователя для среды «MATLAB - Simulink», на основании которой возможно исследование динамических процессов в преобразователе, моделирование работы ЛИДП с учетом характеристик механической нагрузки привода в режиме микроперемещений, определение регулировочных характеристик преобразователя.

2. Определены инженерные соотношения для электрических параметров линейного индукционно-динамического преобразователя в функции диаметра индуктора.

3. Проанализированы различные типы управляющих воздействий, получены регулировочные характеристики, что позволяет в дальнейшем выполнять разработку ЛИДП с учетом реальных требований исполнительных механизмов и оптимизировать параметры устройства по различным критериям.

### Список использованной литературы

1. Болюх В.Ф. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії: монографія / В.Ф. Болюх, В.Г. Данько. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – 260 с.
2. Болюх В.Ф. Синтез параметров высокоэффективного электромеханического

преобразователя ударного действия / [В.Ф. Болюх, А.М. Марков, В.Ф. Лучук, И.С. Щукин] // Техн. электродинамика. Тем. выпуск: Проблемы современной электротехники. - 2008. - Ч. 2. - С. 63-68.

3. Хуторненко С.В. Математична модель п'єзорезонансного пристрою в засобах автоматизації механотронних систем / С.В. Хуторненко, Д.А. Семенець // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – 2011. – №21(189). – С. 159 – 167.

Надійшла до редакції:  
18.02.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Ковальов Є.Б.

**Д.А. Семенець, М.Я. Шевченко**

**Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут УІПА**

**Комп'ютерне моделювання лінійного індукційно-динамічного перетворювача в режимі мікропереміщень.** У роботі представлені розрахункові співвідношення і математична модель лінійного індукційно-динамічного перетворювача для режиму мікропереміщень, на підставі яких розроблена комп'ютерна модель ЛІДП. На підставі отриманої моделі визначені регульовальні характеристики і проведений аналіз типів керуючих сигналів для перетворювача.

**Ключові слова:** привід мікропереміщень, лінійний індукційно-динамічний перетворювач, комп'ютерна модель, регульовальні характеристики.

**D. Semenets, N. Shevchenko**

**Educational and Scientific Professional Pedagogical Institute UEPA**

**Computer Design of Linear Induction-dynamic Transformer in the Mode of Micro-movements.**

In this work the necessity of research of electromechanical drive for implementing linear motion in the micrometer range – a linear induction-dynamic transformer – is substantiated. The transformer is considered as a system of interrelated components: an elastic mechanical part (movable anchor - working body), driven by the electromagnetic force generated by a flat coil of shorted anchor rigidly attached to the working body moving in the magnetic field of the inductor. Inductor coil is excited by periodic rectangular pulses, which are characterized by amplitude, frequency, duty cycle. Based on the known results of the optimization of such devices of impact action the ratios for the main LIDP parameters in the inductor diameter function are defined.

Based on the original system of differential equations describing the dynamic processes in the converter we developed a mathematical model of a linear induction-dynamic converter for small displacements mode. Based on the obtained model control characteristics were determined and the analysis of types of control actions for the converter was performed. To ensure the greatest linearity of control characteristic it is recommended to use pulse amplitude modulation of the control signal for large displacements and pulse frequency modulation for small displacements. The developed model and the obtained relations allow designing the further LIDP considering real requirements of actuators and optimizing the machine settings according to different criteria.

**Keywords:** drive of micro-movements, linear induction-dynamic transformer, computer model, regulation descriptions.