

П. А. Грахов, А. В. Федин

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ УГЛОВЫХ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПЛАСТИН

Проведено моделирование магнитоэлектрических устройств угловых микроперемещений на основе магнитоэлектрических многослойных пластин как многостороннего нелинейного преобразователя с учетом тепловой стороны, рассмотрены вопросы конструктивного решения устройств угловых микроперемещений изгибного действия, получены статические и динамические характеристики, позволяющие уточнить вопросы проектирования прецизионных систем с магнитоэлектрическими исполнительными устройствами. *Исполнительное устройство; магнитоэлектрические деформации; многослойная пластина; угловые перемещения; трехсторонний преобразователь; структурная схема; статические и динамические характеристики*

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и исследование исполнительных устройств (ИУ) микро- и наноперемещений имеет важное значение для многих современных технологий. Силовые элементы высокоточного линейного и углового позиционирования инерционных, упругоустановленных на основании объектов необходимы разработчикам прецизионных электронно-оптических систем, систем компенсации динамических возмущений в станкостроении, привода транспортные средств и т. д. [1, 2].

Требуемый диапазон угловых перемещений могут обеспечить ИУ на основе магнитоэлектрических эффектов: Джоуля, Видемана [3] или эффекта изгибных деформаций [4].

ИУ на эффекте Джоуля работают в диапазоне единиц или десятков угловых секунд, но требуют применения механизма преобразования движения. Закручивание магнитоэлектрического элемента в геликоидальном магнитном поле (эффект Видемана) используется при построении силовых ИУ, непосредственно перемещающих нагрузку и предназначенных для работы в диапазоне угловых секунд и единиц угловых минут при развиваемом моменте порядка сотен Ньютонов на метр [3].

Обеспечение диапазона перемещений порядка десятков угловых минут, при развиваемом моменте от единиц до десятков Ньютонов на метр, возможно при использовании эффекта изгибных деформаций [4]. Активный элемент в весьма перспективных ИУ такого типа реализован в виде многослойной магнитоэлектрической пластины (МП), слои которой, лежащие по разные стороны от плоскости изгиба, выполня-

ются из материалов с различными магнитоэлектрическими свойствами.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Вопросы конструктивного решения и математического описания магнитоэлектрических исполнительных устройств (МСИУ) различного назначения привлекают внимание отечественных и зарубежных исследователей, особенно в связи с возможностями современных материалов на основе редкоземельных металлов, обладающих высокими значениями магнитоэлектрических деформаций [5–8]. Новейшие исследования характеристик ИУ и моделирование, однако, в основном привязаны к преобразователям линейного перемещения на эффекте Джоуля – актуаторам [5, 8]. Таким образом, исследование конструкций и характеристик устройств углового позиционирования, в частности на основе МП является актуальной задачей.

Математическое описание ИУ изгибного действия обладает своей спецификой ввиду очевидных конструктивных особенностей: неоднородности активного элемента, кинематической схемы работы на нагрузку и т. д. [9].

При моделировании линейных МСИУ используются различные подходы [5, 10], в том числе методики на основе описания экспериментальных электромеханических характеристик [8]. Вполне обоснованно за рамки математического описания выносятся некоторые особенности (магнитная и деформационная «предыстория», эффекты формы, наличие примесей, дефектов, наведенная анизотропия свойств и др.), которые следует учитывать индивидуально.

Однако, как в линейном приближении, так и в нелинейном варианте моделирования ИУ, на наш взгляд не уделяется должное внимание ряду факторов, влияющих на характер процессов

намагничивания и деформирования активного элемента, что важно при проектировании исполнительных элементов для прецизионных систем.

Не оценивается (или не учитывается в достаточной мере) [3, 5] влияние изменений текущей температуры, намагничности и динамики внутреннего напряженного состояния на характеристики материалов, на другие параметры активного элемента.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Настоящая работа посвящена описанию конструкций, математическому моделированию и теоретическому исследованию характеристик МСИУ угловых перемещений на основе МП.

Рассматривается конструкция с активным элементом в виде многослойной МП, позволяющая реализовать ИУ на базе изгибных деформаций с чисто угловыми перемещениями нагрузки [11]. Продольно-неоднородная вдоль оси абсцисс структура МП позволяет сформировать мнимое шарнирное крепление в центре, где перемещаемый объект выполняет чисто угловые движения.

Расчетная конструктивная схема МСИУ с балочной шарнирной установкой МП на основании и нагрузкой типа «обобщенной опоры» приведена на рис. 1.

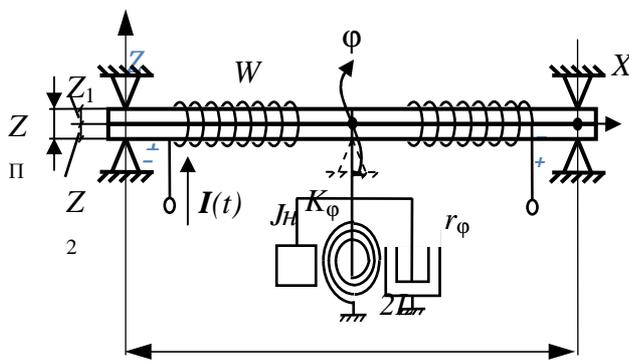


Рис. 1. Расчетная конструктивная схема МСИУ

В МП толщиной Z_p длиной $2L$ и шириной b , продольные слои состоят из двух жестко соединенных частей, с разными коэффициентами магнитострикции, например, пара пермендюр – никель. Толщины слоев – Z_1 и Z_2 . Каждый слой в свою очередь также может представлять собой многослойную структуру.

Отметим, в схеме МСИУ изгибного действия традиционные активные материалы позво-

ляют реализовать приемлемые выходные характеристики. Возможности построения ИУ на биморфных элементах на основе сверхтонких пленок из материалов группы Fe-Ga, обладающих «гигантской» магнитострикцией [7], пока остаются не реализуемыми для класса силовых быстроедействующих ИУ.

Замкнутая магнитная цепь реализуется в плоскости XOY по ширине МП. Обмотка содержит W витков. Управляющее воздействие – ток обмотки $I(t)$. Постоянная составляющая тока создает магнитную поляризацию МП для обеспечения нечетного характера угловых перемещений нагрузки $\varphi(t)$, установленной в центре пластины при x равном L . Параметры нагрузки («обобщенной опоры») J_n , K_φ и r_φ соответственно: инерционность, жесткость на кручение и демпфирование нагрузки.

В другой конструкции МСИУ [12] используется как минимум еще одна МП, устанавливаемая механически параллельно первой под углом относительно места крепления перемещаемого объекта, но встречно по управляющему воздействию. В ИУ образованы две магнитные системы из половин МП и магнитных «шунтов» с обмотками. Это позволяет как при наличии подмагничивания, так и при отсутствии магнитной поляризации, перемещать объект в разных направлениях подачей тока в соответствующие обмотки магнитных систем.

Целесообразность структурного представления модели магнитострикционного преобразователя, в том числе и ИУ угловых перемещений на базе изгибных деформаций МП определяется областью его применения как элемента САУ [3, 5].

Построенная в данном формате линеаризованная математическая модель учитывает распределенность параметров МП [9, 10]. При магнитнополяризованном активном элементе активные материалы работают в пределах частного цикла перемагничивания (режим малого сигнала) со слабовыраженной нелинейностью (и неоднозначностью) магнитной и магнитомеханической характеристик. Полагается, что в механическом смысле материалы следуют закону Гука, влияние геометрических нелинейностей прогиба исключается рассмотрением МП, соответствующих тонким плитам, и применением шарнирной установки активного элемента.

Модель позволяет для любых выбранных активных материалов (традиционных или на основе редкоземельных сплавов) исследовать в первом приближении характеристики МСИУ, весьма полезна для предварительного анализа и вы-

бора параметров ИУ на основе МП [9], но имеет и очевидные ограничения.

При значительной инерционности перемещаемых объектов, упруго установленных на основании, возможность достижения максимальных характеристик ИУ по диапазону и быстродействию предполагает работу активных материалов во всем возможном диапазоне изменения намагниченности [13, 14], но при этом допустимо интерпретировать МСИУ как систему с сосредоточенными параметрами.

В этих условиях математическое описание следует скорректировать, учитывая нелинейности электромагнитного и магнитомеханического преобразований [15]. Для обеспечения точности и адекватности модели следует также оценить влияние на характеристики ИУ внутренних динамических напряжений, изменений намагниченности и температуры активного элемента. Режим работы ИУ без подмагничивания по способу, описанному в [12], подразумевает несколько меньшее влияние температурных изменений, но исключить из анализа их влияние на характеристики нельзя, особенно в условиях слабого термостатирования.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим феноменологическую блок-схему МСИУ угловых перемещений (рис. 2) полагая его, по крайней мере, трехсторонним преобразователем [10].

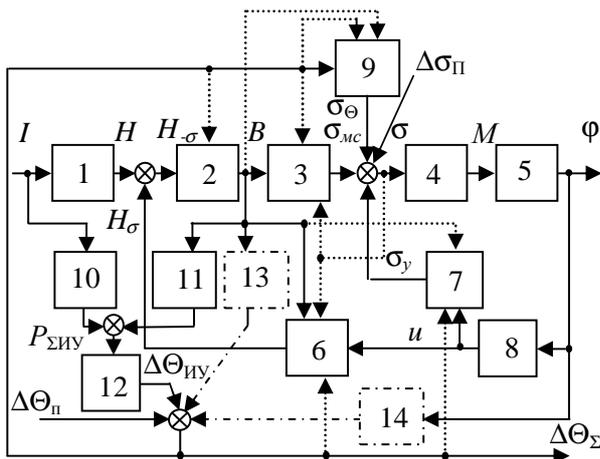


Рис. 2. Феноменологическая блок-схема МСИУ

ИУ представляется электромеханическим многократным преобразователем ($I \rightarrow H \rightarrow B \rightarrow \sigma_{mc} \rightarrow M_{mc} \rightarrow \varphi$) с каналом помехи по механическому напряжению $\Delta\sigma_{\Pi}$ (например, по моменту,

создающему предварительные упругие напряжения), обратной связью по магнитоупругому эффекту ($\varphi \rightarrow u \rightarrow H_{\sigma}$), и в структуре учтена тепловая сторона ($\Delta\Theta_{\Sigma} \rightarrow \sigma_{\Theta} \rightarrow M_{\Theta} \rightarrow \varphi$). Здесь входной сигнал термомеханического преобразователя – поле превышения температуры $\Delta\Theta_{\Sigma}$ (усредненное по МП) по отношению к температуре активного элемента $\Theta_{АЭ}$ в °С или °К (с учетом возможной внешней помехи $\Delta\Theta_{\Pi}$), σ_{Θ} – механические напряжения вследствие теплового расширения слоев МП, создающие момент термодинамических сил M_{Θ} .

Предложенная схема (рис. 2) справедлива и для ИУ угловых перемещений на эффектах Видемана, а с некоторыми оговорками и для ИУ угловых перемещений на эффекте Джоуля.

Формально (например, следуя методикам [3, 5]) блок-схема (рис. 1) также описывает и структурную схему МСИУ на основе МП (например, по рис. 1, но с одним активным слоем) как элемента САУ.

При построении модели по аналогии с работами [3, 15] используются: уравнение динамического равновесия моментов при угловом позиционировании объекта (типа обобщенной опоры), установленного на МП

$$M_{mc} + M_{\Delta\sigma} - M_y - r_{\Sigma} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \frac{1}{J_{\Sigma}}, \quad (1)$$

и система уравнений состояния среды, обладающей магнитоупругими свойствами [6]:

$$\begin{cases} \sigma = E(B, \Delta\Theta)(u + \alpha_{\Theta}\Delta\Theta) + R'(\sigma, \Delta\Theta)B^2 \\ H = H_{-\sigma}(B, \Delta\Theta) + R'(\sigma, \Delta\Theta)Bu, \end{cases} \quad (2)$$

где M_{mc} – момент, создаваемый магнитоstrictionными силами, $M_y = K_{\Sigma}\varphi$ упругий момент, σ – продольное механическое напряжение в материале пластинки, $u = \Delta l/L$ – относительная линейная деформация активного слоя пластины, Δl – линейная деформация активного слоя пластины, E – модуль упругости материала МП, R' – продольный пьезомодуль неполяризованного магнитоstrictionного материала (с учетом поперечных деформаций) [10], H и B – напряженность и индукция магнитного поля в МП вдоль оси абсцисс, α_{Θ} – коэффициент теплового расширения материала МП, $H_{\sigma}(B, \Delta\Theta)$ – функционал, описывающий кривые намагничивания активного материала с учетом магнитных потерь [16]. Параметры J_{Σ} , K_{Σ} и r_{Σ} соответственно: инерционность, жесткость на кручение и внешнее демпфирование системы ИУ-нагрузка.

Система уравнений (2) описывает продольное напряженно-деформированное состояние магнитоstrictionных слоев пластины (приве-

денные к срединной поверхности) и магнитное состояние активных пластин с учетом влияния на коэффициенты механических напряжений, намагниченности и температуры.

В отличие от [6] модель также учитывает вместе электромагнитную и магнитомеханическую нелинейности в стилистике традиционного описания магнитоэлектрических преобразователей [3–5] (моделирование осуществлено в пакете прикладных программ Matlab).

Блок 3 схемы (рис. 2) можно рассматривать как преобразователь параметров магнитного поля (индукции B) в магнитоэлектрические напряжения слоев МП и далее посредством кинематической схемы (блок момента 4) в изгибающий момент $M_{\text{м.}}$. Суммарный момент M формируется с учетом упругого противодействия МП и нагрузки (блок 7), а также, в соответствии с первым уравнением состояния системы (2), термодинамического преобразования (блок 9). Момент, действующий на МП, преобразуется в изгиб активного элемента и угловые перемещения объекта φ (блок механического движения 5). Блоки 1 и 2 описывают соответственно электромагнитное преобразование тока обмотки I в напряженность магнитного поля H и нелинейную зависимость B от H активного материала. Блоки 8 и 6 реализуют обратную связь по магнитоупругому преобразованию (в соответствии со вторым уравнением состояния). Блоки 10 и 11 отражают наличие потерь мощности $P_{\Sigma\text{ИУ}}$ на омическом сопротивлении катушки намагничивания и магнитных потерь на гистерезис и вихревые токи при перемагничивании МП, вызывающих (блок 12) приращение температуры $\Delta\Theta_{\text{ИУ}}$. При необходимости (адиабатические условия, активные материалы с низкими температурами фазовых превращений) могут быть дополнительно учтены магнитокалорический (блок 13) и эластокалорический (блок 14) эффекты.

В обычных условиях эксплуатации ИУ исходная рабочая температура активного элемента $\Theta_{\text{АЭ}}$ составляет 20 ± 40 °С, а значения $\Delta\Theta_{\Sigma\text{ИУ}}$ превышения рабочей температуры редко достигают величин более 40 °С. В этой связи за исключением биметаллического прогиба влиянием температурного изменения габаритных параметров на коэффициенты в расчетных выражениях можно пренебречь. В блок-схеме (рис. 2) учтены случаи значимого влияния тепловой стороны на коэффициенты преобразований блоков и зависимости коэффициентов преобразования различных блоков от намагниченности и упругих напряжений (данные связи показаны пунктирными линиями).

Передаточные функции блоков феноменологической схемы определены в предположении, что модуль упругости E и магнитная проницаемость являются величинами, учитывающими диссипацию энергии [10].

Передачная функция электромагнитного элемента (блок 1) имеет вид $W_1(p) = k_p W / 4,4L$, где k_p – безразмерный коэффициент ($0,6 \div 0,9$), учитывающий магнитное рассеяние [17].

У магнитного элемента (блок 2) передачная функция $W_2(p) = (1 / (1 + \eta_{\mu} p)) B(H, \Delta\Theta)$. Для аппроксимации кривой намагничивания использовалась кубическая сплайн-интерполяция. Функция $B(H, \Delta\Theta)$ задана в виде многомерной таблицы, учитывающей зависимость кривой намагничивания от превышения температуры, а η_{μ} – коэффициент, учитывающий магнитные потери в МП [10].

Магнитоэлектрический элемент (блок 3) в соответствии с первым уравнением системы (2) описывается квадратичной зависимостью магнитомеханического напряжения от магнитной индукции B [6] и магнитомеханическим коэффициентом $R'(\sigma, \Delta\Theta_{\Sigma})$. Зависимость R' от упругих напряжений σ задается аппроксимацией экспериментальных зависимостей полагая ее аналогичной изменению магнитоэлектрической насыщенности от напряжения, а функциональная зависимость от $\Delta\Theta_{\Sigma}$ определена по экспериментальным данным магнитоэлектрической насыщенности в рабочем диапазоне изменения температур активного материала [16].

Передачная функция блока момента (блок 4) определена как $W_4(p) = nbZ_k Z_{lk}$, где n – количество пластин (в данном случае две) Z_{lk} и Z_k соответственно: толщина слоев МП, расстояние от плоскости изгиба до срединных плоскостей k -х слоев.

Уравнение динамического равновесия изгибающих моментов (1) позволяет, полагая внешнее демпфирование незначительным, записать для блока 5 следующую передачную функцию: $W_5(p) = (1 / J_{\Sigma})(1/p^2)$.

Передачная функция блока магнитоупругого эффекта записывается в соответствии со вторым уравнением системы (2) $W_6(p) = R'(\sigma, \Delta\Theta_{\Sigma})$ и совпадает с передачной функцией блока магнитоэлектрического элемента.

Для упругого блока 7, учитывая жесткость на изгибное кручение МП [17, 18] получим $W_7(p) = E(B, \Delta\Theta_{\Sigma})(1 + \eta_E p) Z_{\text{П}}^3 b / (6L)$, где η_E – диссипативный коэффициент, учитывающий потери на внутреннее трение [4].

Зависимость $E(B, \Delta\Theta_{\Sigma})$ также представлена в виде многомерной таблицы с использованием кубической сплайн-интерполяции.

В блоке 8 угловое перемещение нагрузки φ преобразуется в относительные линейные деформации активного слоя, приведенные к его срединной поверхности $W_8(p) = Z_{lk} / L$.

Для блока 9 термодинамического преобразования справедлива передаточная функция $W_9(p) = \alpha_{\Theta} E(B, \Delta\Theta_{\Sigma})$ в соответствии с 1-м уравнением состояния системы (2).

Блоки 10 и 11 определяются на основании выражения для средней мощности электрических потерь в катушке и магнитных потерь на перемагничивание [17]. Влиянием на нагрев МП потерь на деформирование пренебрегаем.

Стандартное уравнение теплового баланса [7] позволяет записать в первом приближении среднее превышение температуры $\Delta\Theta_{\Sigma ИУ}$ по выделяющейся в ИУ мощности $P_{\Sigma ИУ}$ (Вт) и среднему коэффициенту теплоотдачи k_T (Вт/(м² · К⁰)), считая их постоянными величинами: $\Delta\Theta_{\Sigma ИУ} = (P_{\Sigma ИУ} / Fk_T) (1 - e^{-(Fk_T t) / Gc})$. Здесь G – масса проводника, кг; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); F – поверхность теплоотдачи ИУ,

м². Следовательно, тепловой элемент (блок 12) описывается аperiodическим звеном.

Математическая модель конструкции МСИУ, где используется, как минимум, еще одна МП [12], относит «пассивную» половину ИУ к дополнительной нагрузке (жесткость, инерционность).

Моделирование ИУ осуществлено в пакете прикладных программ Matlab (рис. 3) в предположении, что термобиметаллический прогиб компенсируется.

Модель представляется набором операторов-подпрограмм, каждый из которых описывает некоторый функционально законченный блок структурной схемы системы, а список формальных параметров операторов определяет характер связи отдельных блоков друг с другом.

Предложенная модель позволила получить динамические и статические характеристики и уточнить поведение МСИУ как многостороннего преобразователя, с учетом изменения коэффициентов. Расчеты приведены для двухслойных МП толщиной $Z_{П}$ равной 2×10^{-3} м, длиной $L = 0,1$ м и шириной $b = 0,01$ м, с активными слоями, выполненным из пермендюра К49Ф2 и никеля Н2П при количестве витков обмоток равном 200.

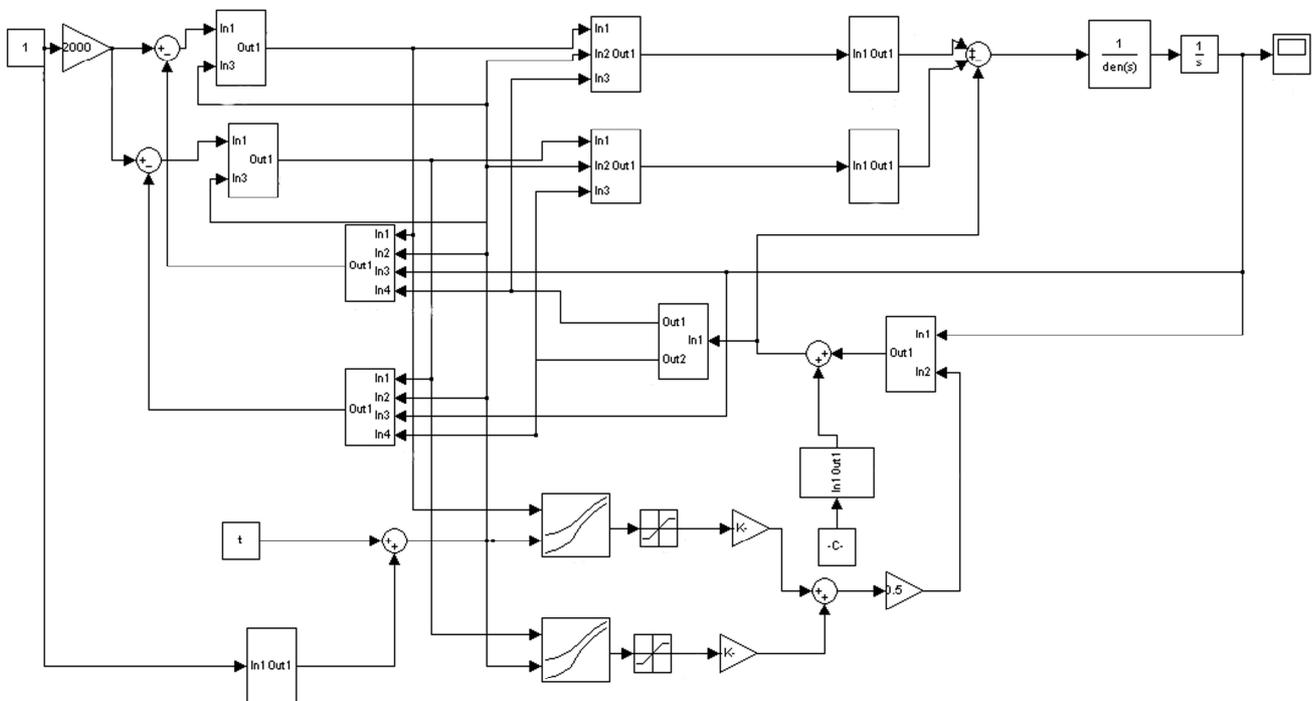


Рис. 3 Структурная схема МСИУ в программе Matlab (Simulink)

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Переходная характеристика (рис. 4) для ИУ по рис. 1 подтверждает известное положение: МСИУ слабодемпфированный, но достаточно быстродействующий исполнительный элемент [10] (время достижения установившегося значения без нагрузки составляет около 0,0012 с, при воздействии тока 2 А).

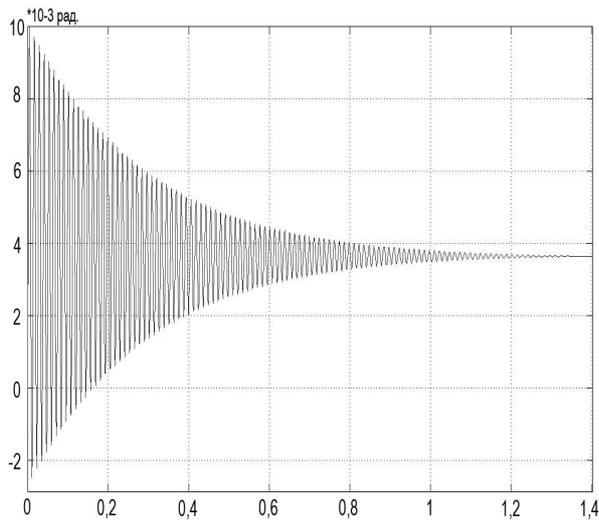


Рис. 4. Переходная характеристика МСИУ

Тем не менее, уже статические характеристики (рис. 5) конструкции МСИУ по [12] для различных значений $\Delta\Theta_{\Sigma}$ показывают заметное изменение коэффициента передачи по основному каналу от температуры. Следовательно, влияние текущей температуры следует учитывать при построении системы управления приводом введением соответствующей коррекции.

Влияние температуры на динамические свойства оказывается менее значимыми.

Изменения выходной величины вследствие термобиметаллического прогиба МП являются сравнительно медленными по сравнению с магнитострикционными перемещениями (тепловая постоянная времени более чем на два порядка превышает время всего электромеханического переходного процесса [3]), причем изменения происходят в направлении, противоположном магнитострикционным перемещениям.

В силу специфики применения ИУ в быстродействующих САУ эти перемещения могут быть отработаны «медленным» приводом грубой ступени или исключены конструктивным решением как в МСИУ по [12] с силовой компенсацией термобиметаллического прогиба.

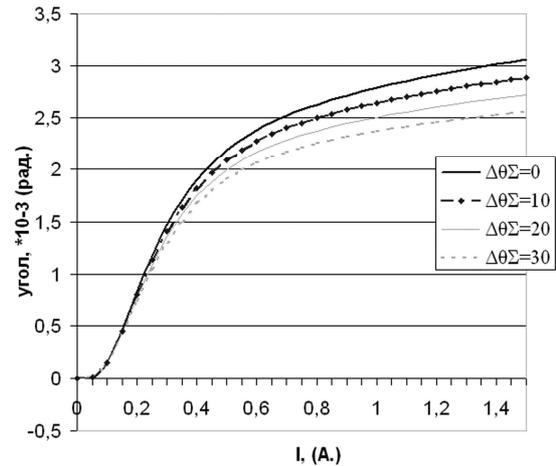


Рис. 5. Статические характеристики МСИУ без упругой нагрузки для различных значений $\Delta\Theta_{\Sigma}$

На данном этапе не проводились исследования влияния предварительных упругих напряжений на статические характеристики, хотя модель позволяет это сделать. Текущие изменения упругих напряжений заметного влияния на динамику не оказывают. В то же время учет влияния величины намагниченности на свойства активных материалов (рис. 6) является вполне целесообразным и в статике.

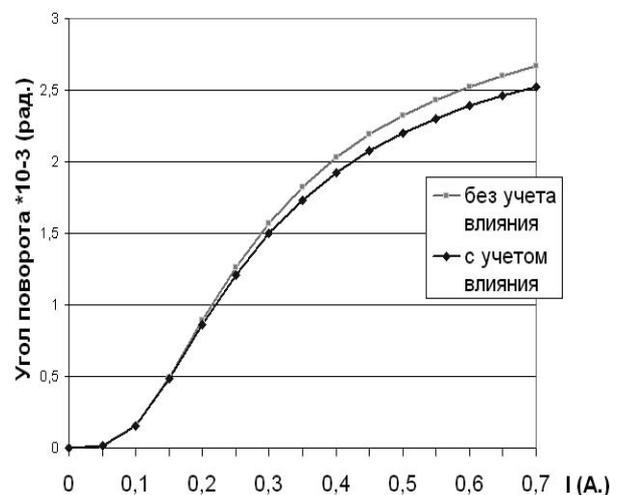


Рис. 6. Статические характеристики МСИУ с учетом влияния намагниченности на упругие свойства активных материалов и без него

Заметное влияние на статические характеристики ИУ оказывает жесткость нагрузки.

Выходная величина φ экстремально [9, 15] изменяется в зависимости от $Z_{П}$ (рис. 7) для фиксированных значений: жесткости нагрузки K_{φ} , управляющего воздействия тока 3 А, температуры $\Delta\Theta_{\Sigma}$ 10 °С.

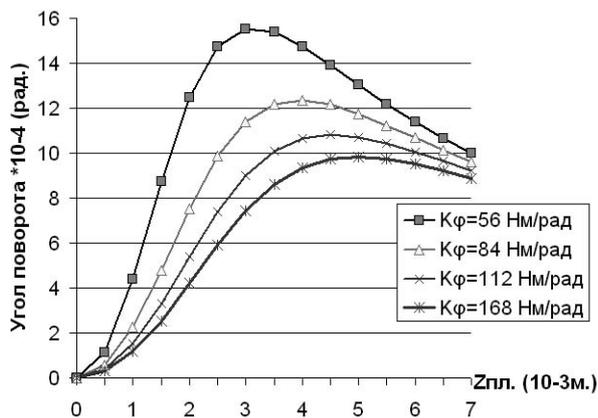


Рис. 7. Статические характеристики МСИУ для различных значений жесткости нагрузки

Для различных значений текущей температуры $\Delta\Theta_{\Sigma}$ экстремальный характер кривых (получены для K_{ϕ} равного 56 нм/рад) сохраняется, но достаточно заметно снижается выходное перемещение. Значение $Z_{\text{пл}}$, соответствующее максимуму кривых (рис. 8), остается при этом практически неизменным.

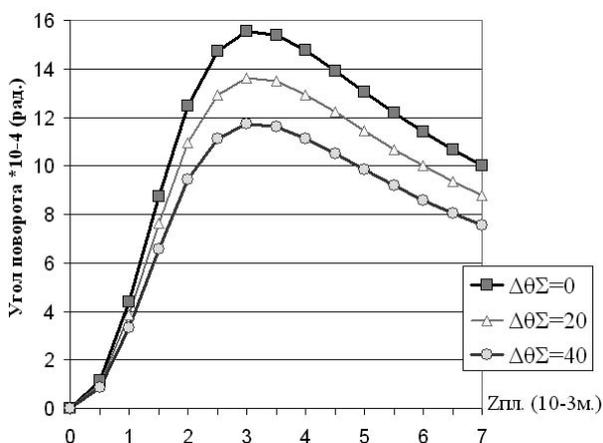


Рис. 8. Зависимость угла поворота ϕ от изменения толщины $Z_{\text{пл}}$ для различных значений $\Delta\Theta_{\Sigma}$

Рассмотренные конструкции МСИУ и полученные по результатам моделирования характеристики свидетельствуют: во-первых, о перспективности таких преобразователей (особенно с учетом возможности использования материалов, обладающих высокими значениями магнитоэлектрических деформаций), а во-вторых, о полезности и адекватности предложенной

модели, которая позволяет осуществлять коррекцию преобразователя, уточнять вопросы построения замкнутой системы управления МСИУ. Полученная модель позволяет более точно оценить доступный диапазон перемещений, выявить оптимальное соотношение параметров с учетом изменений температуры, намагниченности и упругого состояния активного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афонин С. М.** Схемы пьезодвигателей нано- и микроперемещений для прецизионных электромеханических систем // Датчики и системы. 2004. № 9. С. 2–5.
2. **Цодиков С. Ф., Раховский В. И.** Магнитоэлектрические силовые приводы для суперпрецизионного позиционирования // Измерительная техника. 1997. № 5. С. 56–62.
3. **Михайлов О. П.** Магнитоэлектрические исполнительные устройства микроперемещений // Электричество. 1976. № 2. С. 55–61.
4. **Грахов П. А.** Устройства угловых перемещений на основе магнитоэлектрических пластин с неоднородными свойствами // Механика и процессы управления: Тр. XXXIV Уральск. семинара по механике и процессам управления. Т. 2. Уральское отделение РАН. Екатеринбург, 2004. С. 206–213.
5. **Никольский А. А.** Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
6. **Сыркин Л. Н.** Пьезомагнитная керамика. Л.: Энергия, 1991. 160 с.
7. **Белов К. П.** Магнитоэлектрические явления и их технические применения. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 160 с.
8. **Smith R. C., Darino M. J., Seelecke S.** A free energy model for hysteresis in magnetostrictive transducers // Journal of Applied Physics. 2003. 93(1). P. 458–466.
9. **Грахов П. А.** Статические характеристики устройств на основе неоднородных магнитоэлектрических пластин // XXV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 60-летию Победы. Краткие сообщения. Екатеринбург: УрО РАН. 2005. С. 27–29.
10. **Грахов П. А.** Магнитоэлектрические исполнительные устройства для активной оптики (Развитие теории, исследования характеристик и конструкций): дисс... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Уфа: Изд-во Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та, 1999. 226 с.
11. А.с. №1384168 СССР. Магнитоэлектрическое устройство угловых перемещений / П. А. Грахов [и др.]. Оpubл. 07.07.93. в Б.И. №19.
12. **Грахов П. А., Федин А. В.** Патент на изобретение № 2292611 РФ. Магнитоэлектрическое устройство угловых перемещений и способ управления им. Оpubл. 27.01.2007. Бюл. № 3.

13. **Федин А. В.** Моделирование магнитострикционного исполнительного устройства угловых перемещений // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция, посвященная 75-летию УГАТУ: Сб. тр. Т. 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2007. С. 28–29.

14. **Грахов П. А., Федин А. В.** Магнитострикционные исполнительные устройства угловых перемещений // Электротехнические комплексы и системы: Межвузовск. науч. сб. Уфа, 2007. С. 165–168.

15. **Грахов П. А., Федин А. В.** Исполнительное устройство угловых перемещений с инерционной нагрузкой // Механика и процессы управления: Тр. XXXVIII Уральск. семинара. Т. 1. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. С. 242–250.

16. **Бозорт Р.** Ферромагнетизм. М.: ИЛ., 1956. 784 с.

17. **Розенблат М. А.** Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука. 1966. 720 с.

ОБ АВТОРАХ

Грахов Павел Анатольевич, доц. каф. теоретич. основ электротехники. Дипл. инженер по электромеханике (УАИ, 1977). Канд. техн. наук по элементам и устройствам вычислительн. техники и систем управления (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. магнитострикционных исполнительн. устройств прецизионных систем.

Федин Андрей Владимирович, асп. каф. инф.-измерительн. техники. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. магнитострикционных устройств микроперемещений.