

1554058

Московский государственный технический университет
имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи
УДК 621.313.17

ЩЕРБИН Алексей Михайлович

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВодОВ
С УВЕЛИЧЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

05.13.05 - Элементы и устройства ВТ и СУ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

А.Щ.

Москва - 1997

45.41.33
62-83

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук, с.н.с.
Дубин А.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сухинин Б.В.

кандидат технических наук, доцент
Ефремов А.К.

Ведущая организация - Центральный научно-исследовательский
институт автоматики и гидравлики

Защита диссертации состоится " 21 " апреля 1997 г. в 12 ч.
на заседании диссертационного совета К.053.15.06. "Машиностро-
ение" в Московском государственном техническом университете имени
Н.Э.Баумана по адресу: 107005 Москва 2-я Бауманская ул. - 5

Ваши отзывы в 2-х
выслать по указанному а

С диссертацией мс
Н.Э.Баумана.

Автореферат разосла

Ученый секретарь
диссертационного сс
К.Т.Н., с.н.с.

Объем 1 п.л. Тираж
Подпи

1554058



1554058

Щербин А.М. Исполнительные

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время все более возрастающее значение приобретают, так называемые, прецизионные технологии. С созданием и совершенствованием таких технологий неразрывно связано дальнейшее развитие ряда перспективных направлений науки и техники. Новые системы лазерной и СВЧ техники, адаптивной оптики, механообработки, гидравлики, энергомашиностроения и другие, построенные на базе прецизионных технологий, позволяют решать задачи значительно более высокого уровня сложности.

Но, одновременно, создание таких систем взаимосвязано с качественным повышением требований к диапазону рабочих частот, точности приводов и, соответственно, исполнительных элементов (ИЭ). Так, в ряде случаев, для приведенных выше систем требуется ИЭ обеспечивающий амплитуду линейного перемещения в 500+1000 мкм или угол поворота в 5+10 градусов с частотой 500+1000 Гц и точность не хуже чем 1 мкм или 1 угловая секунда, мощностью 20+30 Вт. ИЭ, обеспечивающие совокупность таких параметров на базе традиционных принципов (например электромеханические преобразователи), технически нереализуемы. Одним из возможных вариантов решения является использование ИЭ на нетрадиционных принципах функционирования.

В течение последних 15-20 лет динамичное развитие получила область пьезоэлектромеханических преобразователей (ПЭМП) и, в частности, линейных пьезоэлектрических двигателей (ЛПД). По существу только данный тип устройств потенциально способен решить поставленную задачу. Однако основной проблемой, сдерживающей такое решение, является небольшой и ограниченный диапазон перемещения ЛПД, значение которого в 10-15 раз меньше требуемого.

Таким образом, представляется перспективной и актуальной задача создания исполнительных элементов прецизионных пьезоэлектрических приводов с увеличенным диапазоном перемещения.

Цель работы. Создание ЛПД с мультипликацией выходного линейного и углового перемещения (ЛПДМ) не менее чем в 10-15 раз, позволяющий, в составе прецизионных, высокодинамичных приводов малых перемещений, разработать новое оборудование с качественно более широкими возможностями.

Задачи исследования.

1. Разработка способа увеличения диапазона выходного перемещения ЛПД в 10-15 раз;
2. Разработка математической модели динамики ЛПДМ;
3. Синтез методики расчета ЛПДМ;
4. Экспериментальные исследования макетных образцов ЛПДМ для под-

тверждения теоретических результатов.

Методы исследования. В теоретических исследованиях использовались методы: информационного поиска, теории колебаний, математической физики, численные методы решения систем дифференциальных уравнений. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанном экспериментальном стенде с помощью программного-аппаратного комплекса.

научная новизна.

1. Синтезирована методика расчета исполнительных элементов прецизионных пьезоэлектрических приводов с увеличенным диапазоном линейного и углового перемещения на базе ЛПЦМ
2. Разработаны математические модели динамики исполнительных элементов на базе ЛПЦМ.

Практическая ценность. Результаты исследований позволяют существенно расширить область применения ПЭМП при создании нового оборудования, с качественно более широкими возможностями.

Реализация работы. Результаты работы внедрены в НИР НКТЕ "Пьезоприбор" (г. Ростов-на-Дону), при создании зеркала с управлением отражающей поверхностью, в НИР ЦКБА (г. Тула), при разработке приводов пеленгаторов подвижных объектов и в НИИРЛ МГТУ им. Н.Э.Баумана (г. Москва), при разработке сканатора перспективного тепловизора.

Апробация работы. Материалы данной работы обсуждалась на 2-й Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук", - Москва, 1994; 3-й Международной научной конференции "Международный Симпозиум по Перспективным Электронным Технологиям", - Москва, 1995; научных семинарах кафедры "Автоматические системы и робототехника" МГТУ им. Н.Э.Баумана Москва, 1994-1996; Международной выставке "Автоматизация-94", - Москва, 1994; Международной выставке "Global Sourcing", - Лондон, Великобритания, 1995.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано четыре печатные работы. Кроме того, одна работа находится в печати.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 143 страницах машинописного текста и содержит введение, пять разделов с выводами по каждому из разделов, заключение, 34 рисунка, 4 таблицы, список литературы из 124 наименований и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации,

сформулированы положения, определяющие ее научную новизну, кратко изложено содержание работы по разделам.

Первый раздел посвящен обзору литературы по теме диссертации, обозначена предметная область, проведен сравнительный анализ применяемых ИЭ, в результате которого выбран ИЭ на базе ЛПД, определена основная проблема при использовании ЛПД в различных оборудовании, осуществлена постановка задач исследования.

В настоящее время назрела необходимость в разработке исполнительных элементов для прецизионных автоматических следящих систем управления с малыми линейными и угловыми перемещениями. Но, наиболее распространенные электромеханические преобразователи для получения малых перемещений, имеют ряд серьезных недостатков. В современных приводах всё более широко используются ПЭМИ и, в частности, ЛПД.

Работы по созданию и исследованию приводов на базе ПЭМИ уже более 30 лет проводятся в ряде ведущих отечественных организаций: Центральном научно-исследовательском институте автоматики и гидравлики (Москва), Научном конструкторско-технологическом бюро "Пьезоприбор" (Ростов-на-Дону), Московском энергетическом институте, С.-Петербургском государственном техническом университете, Томском государственном техническом университете и в других такими авторами как Бансевичус Р.Ю., Вишневский В.С., Джагулов Р.Г., Евмененко В.В., Ерофеев А.А., Иванов Е.А., Лавриненко В.В., Никольский А.А., Рагульскис К.М., Сабинин Ю.А., Сильченкова В.В., Трофимов А.И. и другие, а также в ряде промышленно развитых стран: Германии, Японии, Англии, США и в других.

Однако, в большинстве работ указывается на ограниченный диапазон выходного перемещения ЛПД, значение которого в $10+15$ раз меньше требуемого.

Поэтому основной целью данной работы стало создание ЛПД с мультипликацией выходного линейного и углового перемещения ЛПД не менее чем в $10+15$ раз.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие, основные, задачи исследования:

- разработать способ увеличения диапазона выходного перемещения ЛПД;
- разработать математическую модель динамики ЛПДМ;
- синтезировать методику расчёта ЛПДМ;
- экспериментально подтвердить теоретические результаты.

Второй раздел посвящен разработке ЛПДМ, рассмотрены существующие способы увеличения выходного перемещения ЛПД, проведен анализ их возможностей и определены ограничения, предложен новый

способ построения ЛПДМ, разработаны конструктивные варианты.

В настоящее время увеличение диапазона перемещения ЛПД, осуществляется, в основном: 1. увеличением длины активной части ЛПД; 2. использованием промежуточных механических устройств; 3. использованием "шагового" принципа.

Первый вариант, как показывает практика, ограничен следующим: а) увеличением электрической емкости ЛПД; б) возможной потерей устойчивости ЛПД, как сжатого стержня; в) конструктивными параметрами. По первым двум ограничениям, в работе получены выражения для расчета максимального выходного перемещения ЛПД. Третье ограничение возникает когда требуемый ЛПД имеет длину, превышающую допустимый габаритный размер.

Второй вариант приводит к появлению дополнительных жесткостей, люфтов, усложнению конструкции, увеличению габаритных размеров, уменьшению полосы рабочих частот.

Третий вариант позволяет неограниченно увеличить диапазон перемещения, но существенно возрастает сложность конструкции и схемы управления таким ЛПД. "Шаговые" ЛПД имеют небольшие выходные усилие и скорость.

Для увеличения диапазона выходного перемещения ЛПД было предложено использовать наклонное расположение пьезоэлемента (ПЭ) относительно направления выходного перемещения, преобразуя таким образом избыточный запас ЛПД по усилию в увеличение выходного перемещения. Передаточное отношение или коэффициент увеличения перемещения (мультипликации) такого механизма приблизительно равен значению синуса угла между ПЭ и перпендикуляром к направлению выходного перемещения.

На основе предложенного способа были разработаны три конструктивных варианта (рис. 1-3), каждый из которых имеет некоторые особенности, показанные в работе, определяющие область его применения.

В третьем разделе решается задача разработки математической модели динамики ЛПДМ. для решения частных задач разработана упрощенная и линеаризованная модели динамики ЛПДМ.

Рассмотрим ЛПД, состоящий из двух упругих ПЭ, расположенных V-образно, перемещающих башмак, упруго контактирующий с двумя роликами, вращающимися в двух упругих подшипниках (см. рис. 4).

При рассмотрении примем следующие допущения: 1. Перемещения только в плоскости XOY. 2. ЛПД закреплен на абсолютно жестком и не подвижном основании. 3. Масса нагрузки на линейном и момент инерции на вращательном выходе отнесены к массам башмака и ролика соответственно. 4. Приведенные массы ПЭ сосредоточены в точках 1, 2.

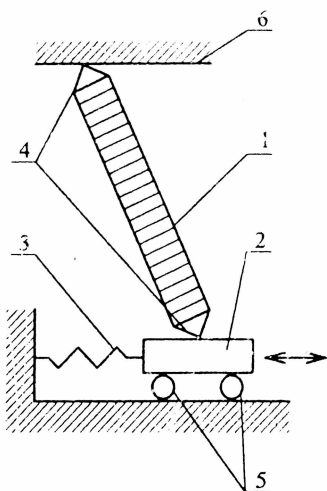


Рис. 1.

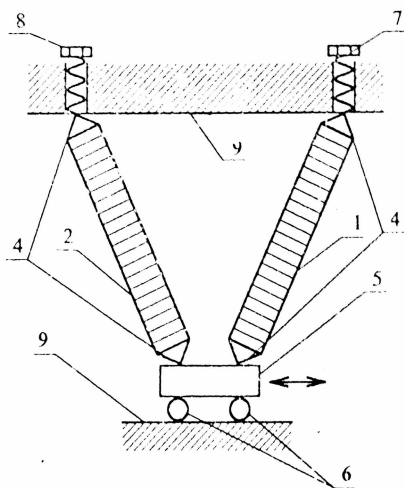


Рис. 2.

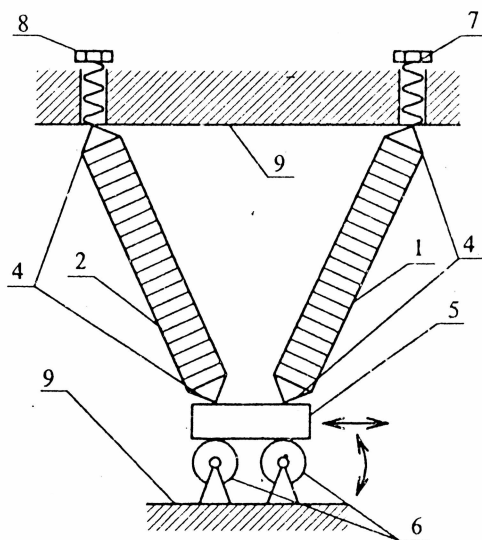


Рис. 3.

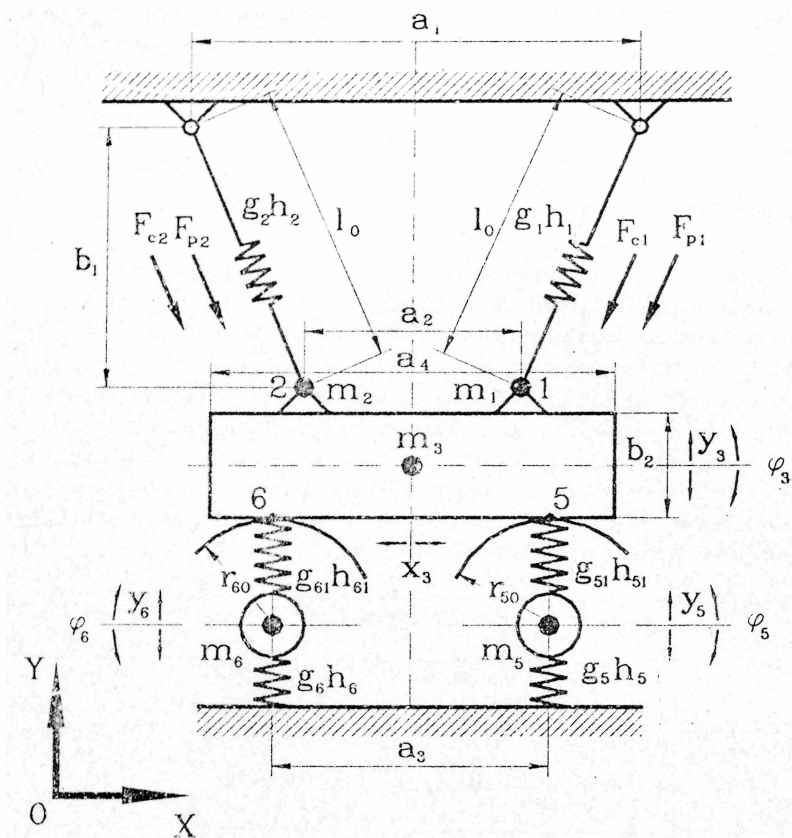


Рис. 4.

С учетом допущений получаем механическую модель, показанную на рис. 4, со следующими обозначениями: x_3, y_3, φ_3 - обобщенные координаты положения башмака; $y_5, \varphi_5, y_6, \varphi_6$ - обобщенные координаты положения роликов; m_1, m_2 - приведенные массы ПЭ, m_3 - масса башмака; m_5, m_6 - массы роликов; коэффициенты жесткости и диссипативных потерь: g_1, h_1, g_2, h_2 - ПЭ, g_5, h_5, g_6, h_6 - в подшипниках; $g_{51}, h_{51}, g_{61}, h_{61}$ - в точках контакта 5, 6; усилия: F_{c1}, F_{c2} - пьезоэлектрические, F_{p1}, F_{p2} - предварительного нагружения; l_1, l_2 - длина ПЭ; r_5, r_6 - радиусы роликов; a_4, b_2 - длина и высота башмака.

Если рассмотреть движение ролика радиусом r по плоскости, и на центр ролика действует сила F под углом α относительно перпендикуляра к плоскости, то возможны 3 принципиально различных варианта угла наклона силы F : относительно критического угла давления качения - α_k и критического угла давления скольжения α_{sk} , и четвертый вариант: нарушение стационарности в точке контакта между роликом и плоскостью ("разрыв контакта"). Поскольку в ЛПДМ башмак взаимодействует с роликами в точках 5 и 6, то необходимо рассматривать два угла давления: α_5, α_6 и общее число сочетаний вариантов становится равным 16. Именно такое количество частных математических моделей динамики полностью описывают данную механическую модель, являющуюся нестационарной. Необходимые обобщенные координаты для каждого из 16 вариантов математических моделей, а также условный номер модели приведены в табл. 1.

Таблица 1.

угол давления	$\alpha_5 < \alpha_{k5}$	$\alpha_{k5} < \alpha_5 < \alpha_{sk5}$	$\alpha_5 < \alpha_{sk5}$	"разрыв контакта"
$\alpha_5 < \alpha_{k5}$	модель №11 U_3, Y_5, Y_6	модель №12 U_3, φ_3, Y_5, Y_6	модель №13 $U_3, \varphi_3, Y_5, Y_6, \varphi_6$	модель №14 $U_3, \varphi_3, Y_5, Y_6, \varphi_6$
$\alpha_{k5} < \alpha_5 < \alpha_{sk5}$	модель №21 U_3, φ_3, Y_5, Y_6	модель №22 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, Y_6$	модель №23 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, Y_6, \varphi_6$	модель №24 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, Y_6, \varphi_6$
$\alpha_5 < \alpha_{sk5}$	модель №31 $U_3, \varphi_3, Y_5, \varphi_5, Y_6$	модель №32 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, \varphi_5, Y_6$	модель №33 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, \varphi_5, Y_6, \varphi_6$	модель №34 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, \varphi_5, Y_6, \varphi_6$
"разрыв контакта"	модель №41 $U_3, \varphi_3, Y_5, \varphi_5, Y_6$	модель №42 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, \varphi_5, Y_6$	модель №43 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, \varphi_5, Y_6, \varphi_6$	модель №44 $X_3, U_3, \varphi_3, Y_5, \varphi_5, Y_6, \varphi_6$

Порядок моделей составляет от 5 (модель №11), до 14 (модели

При разработке математической модели ЛПДМ использовалось, полученное в работах А.А.Никольского, дифференциальное уравнение 1-го порядка, описывающее пьезоэлектрическое усилие, развиваемое ПЭ, с учетом приведения его массы.

Полная математическая модель динамики ЛПДМ, полученная в работе, в силу существенного объема, здесь не приводится.

Основная причина сложности полного математического описания ЛПДМ - учет проскальзывания между башмаком и роликами. Значительно упростить математическое описание можно приняв дополнительные допущения: 1.отсутствие нарушения стационарности в точках контакта между роликом и башмаком; 2.жесткость подшипников и контактная жесткость между роликами и башмаком не влияет на динамические свойства ЛПДМ.

Упрощенная математическая модель, полученная в работе, является стационарной, имеет 4-й порядок, нелинейна. В то же время, для синтеза системы управления, например, желательно наличие линейной математической модели объекта.

Анализ упрощенной математической модели показывает, что источник ее нелинейности - зависимость между удлинением пьезоэлемента и выходным перемещением, которая, как показано в работе, является коэффициентом мультипликации. Проведенная линеаризация последнего, разложением в ряд Тейлора, показала, что в рабочей области диапазона выходного перемещения коэффициент мультипликации можно принять за постоянное значение, зависящее только от начального угла установки ПЭ. Механическую модель, в этом случае, можно представить в виде, показанном на рис. 5. Линеаризованная математическая модель динамики ЛПДМ будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{m_5}{2} + \frac{m_6}{2} + m_3 \right) \ddot{x}_3 &= - (g_1 * x_3 + h_1 * \dot{x}_3) * n^2 - (F_{c1} + F_{p1}) * n - \\ &\quad - (g_2 * x_3 + h_2 * \dot{x}_3) * n^2 + (F_{c2} + F_{p2}) * n \\ \dot{F}_{c1} &= \frac{k_{o1} * U_{y1} - F_{c1}}{c_{k1} * R_{y1}} - \frac{k_{o1} * k_{p1}}{c_{k1}} * \dot{x}_3 * n \\ \dot{F}_{c2} &= \frac{k_{o2} * U_{y2} - F_{c2}}{c_{k2} * R_{y2}} - \frac{k_{o2} * k_{p2}}{c_{k2}} * (-\dot{x}_3) * n \\ n &= \sin(\arctg((a_1 - a_2) / (2 * b_1))) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

На рис. 6 линеаризованная математическая модель динамики ЛПДМ представлена в виде структурной схемы. В работе также приведены передаточные функции, соответствующие структурной схеме.

Четвертый раздел посвящен синтезу методики расчета ЛПДМ.

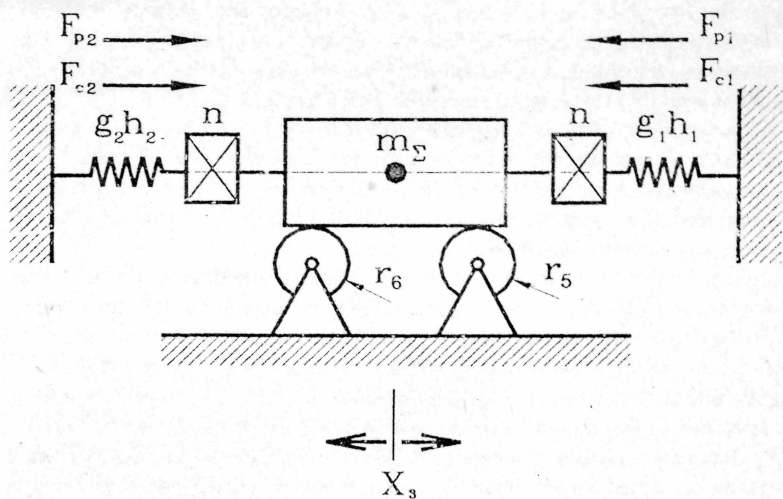


Рис. 5.

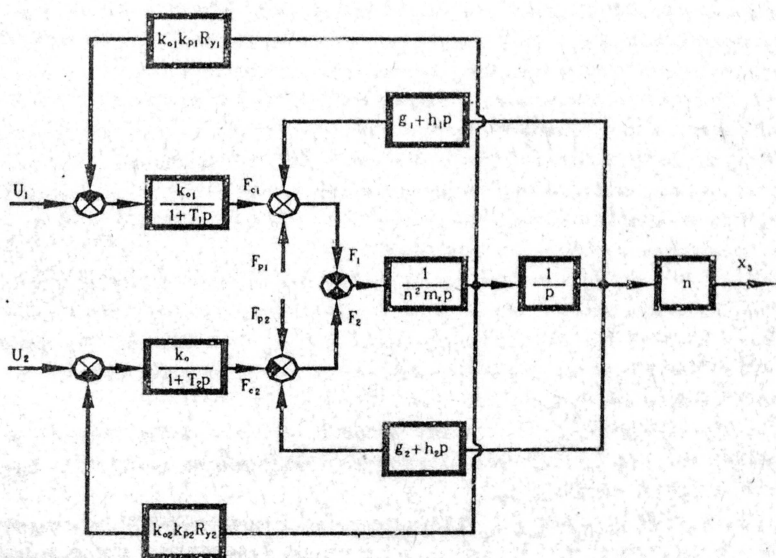


Рис. 6.

определены критерии применения ЛПДМ в конкретной задаче, обосновано использование метода ЛП-поиска, выбраны варьируемые параметры, рассчитаны границы изменения варьируемых параметров, определены параметрические и функциональные ограничения.

В задачах с линейным перемещением нагрузки, критерий применения ЛПДМ - превышение ЛПД одного из ограничений: по электрической емкости ПЭ, по механической устойчивости ПЭ и по габаритным размерам ЛПД. В работе получены выражения, позволяющие количественно рассчитать данные ограничения.

В задачах с вращением нагрузки на ограниченный угол необходимо использование ЛПДМ по конструктивному варианту №3 (см. рис. 3), так как в работе показано, что альтернативных решений поставленных задач по повороту нагрузки на ограниченный угол с требуемым сочетанием частоты, амплитуды, момента и достаточной мощности в настоящее время не известно.

На следующем шаге расчета ЛПДМ определяются параметры направляющих для конструктивных схем №1 и №2 или опор вращения для конструктивной схемы №3, которые определяют минимальный угол наклона ПЭ и, соответственно, максимальное увеличение перемещения.

Далее в работе показана необходимость использования в методике расчета ЛПДМ оптимизационной процедуры. На основе анализа существующих методов выбран ЛП-поиск - метод выбора наилучших параметров в задачах со многими критериями. В соответствии с данным методом, выбраны варьируемые параметры. Рассчитаны границы изменения варьируемых параметров. Для исключения вариантов сочетания параметров ЛПДМ, нереализуемых технически, определены функциональные ограничения. Получены критерии качества, определяемые численным решением математической модели динамики ЛПДМ и расчетом по выбранным варьируемым параметрам.

В общем виде, расчет ЛПДМ по синтезированной методике, проводится в следующем порядке: 1. проверка возможности применения ЛПДМ; 2. расчет параметров направляющих и опор вращения; 3. расчет пределов изменения варьируемых параметров; 4. собственно выбор наилучших параметров ЛПДМ по ЛП-поиску.

Ввиду сложности и объемности вычислений, и с целью комплексной автоматизации расчетов, разработан программный комплекс, состоящий из ряда модулей.

Пятый раздел содержит результаты экспериментальных исследований, приведено описание экспериментальной установки, исследовано влияние различных параметров ЛПДМ на выходные характеристики, приведены результаты исследования макетного образца ЛПДМ в составе привода сканатора для тепловизора.

Разработанная для проведения исследований ЛПДМ, экспериментальная установка, состоящая из испытательного стенда и программно-аппаратного комплекса (рис. 7), позволяет в значительной мере автоматизировать и ускорить этот процесс.

Исследовалось влияние величины предварительного нагружения на выходные параметры ЛПДМ: амплитуду выходного перемещения или поворота, характеристики резонансов в рабочей области частот, линейность статической характеристики, наличие и величина проскальзывания между башмаком и роликами. Выбор величины предварительного нагружения для исследования определялся тем, что оно является основным и единственным средством регулировки ЛПДМ после его изготовления и сборки.

В результате исследований было выявлено, что с увеличением усилия предварительного нагружения: а) уменьшается амплитуда выходного перемещения; б) исчезает второй резонансный пик, а первая резонансная частота смещается вправо (выше) по оси частот; в) увеличивается величина сухого трения и ухудшается линейность статической характеристики. При небольшом усилии предварительного нагружения на резонансной частоте наблюдается непрерывное вращение выходного вала со скоростью 110...120 об/мин - вследствие проскальзывания между последним и башмаком (см. рис. 8, кривые 1 и 2), а при увеличении усилия предварительного нагружения эффект непрерывного вращения не наблюдается (кривые 3 и 4).

Проведено сравнение данных, полученных в результате математического моделирования ЛПДМ по полной модели, и данных, полученных в результате натурных экспериментов. Совпадение экспериментальных данных: по проскальзыванию выходного вала и зависимости частотных свойств ЛПДМ от величины предварительного нагружения, позволяет сделать вывод о правомерности допущений, принятых при разработке полной математической модели, и о ее адекватности объекту исследования.

Полученные в работе упрощенная и линеаризованная математические модели динамики ЛПДМ, основываются на принятии дополнительных допущений. Экспериментальные исследования, проведенные с целью проверки корректности принятых дополнительных допущений, показали, что в области частот до первого механического резонанса ЛПДМ данные, полученные по упрощенной и линеаризованной математическим моделям динамики, отличаются от данных натурального эксперимента и полной математической модели не более чем на $8 \pm 10\%$ (рис. 9). Полученное совпадение позволяет говорить о корректности принятых дополнительных допущений, и об адекватности математической

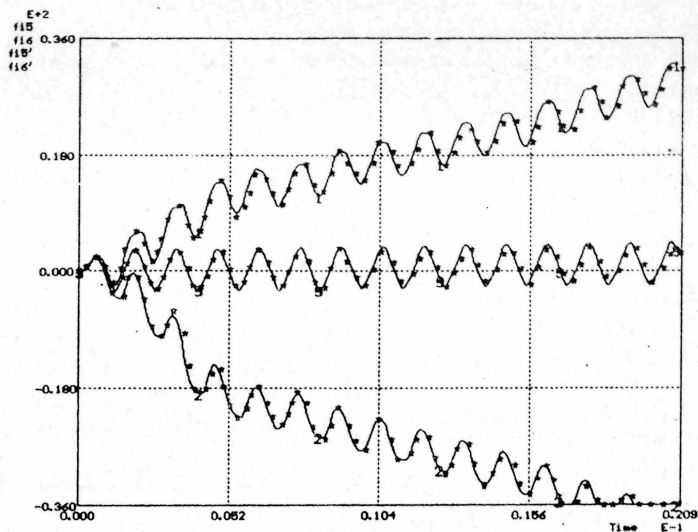


Рис. 8.

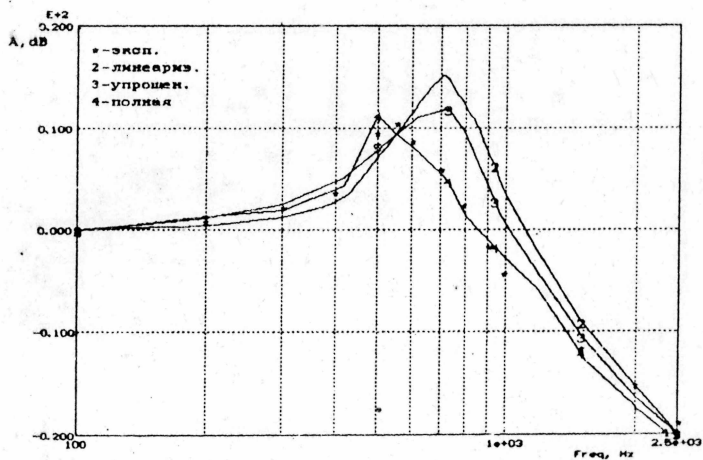


Рис. 9.

модели и реального объекта в дорезонансной области частот. В области частот выше первого резонанса, имеют место более существенные различия. Это накладывает ограничения на применение упрощенной и линеаризованной моделей ЛПДМ в области частот выше первого резонанса.

Комплексная проверка научных результатов диссертационной работы проведена при разработке исполнительного элемента привода сканирующего зеркала телевизора. Расчет ЛПДМ по синтезированной методике позволил разработать исполнительный элемент, полностью удовлетворяющий техническому заданию. Проведенные испытания дали возможность сопоставить данные о его предполагаемых (на этапе расчетов и математического моделирования) параметрах с данными натурных экспериментов (рис. 10), и позволили сделать вывод о том, что синтезированная методика расчета позволяет еще на стадии проектирования ЛПДМ с высокой достоверностью прогнозировать его параметры.

Приложение. В приложении приведены исходные тексты основных модулей программного комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К основным научно-техническим результатам диссертационной работы следует отнести следующие:

1. Предложен новый способ увеличения (мультипликации) диапазона выходного перемещения ЛПД, реализованный в нескольких конструктивных вариантах ЛПД с мультипликацией перемещения (ЛПДМ).
2. Разработан ряд математических моделей динамики ЛПДМ.
3. Синтезирована и реализована в программном комплексе инженерная методика расчета ЛПДМ.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный в работе способ позволяет увеличить диапазон выходного перемещения ЛПД в 10-15 раз.
2. Разработанные конструктивные варианты позволяют не только увеличить диапазон выходного перемещения ЛПД, но и получить дополнительный выход вращения на ограниченный угол.
3. Разработанный ряд математических моделей динамики ЛПДМ позволяют как проводить, в сочетании с программным комплексом, достоверное математическое моделирование, так и синтезировать систему управления.

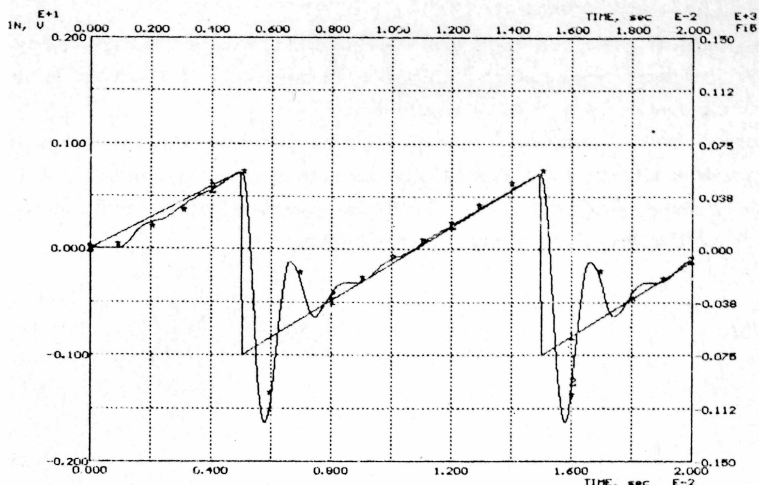


Рис. 10.

4. Теоретические результаты работы были подтверждены экспериментальными исследованиями макетных образцов на разработанной экспериментальной установке, состоящей из испытательного стенда и программно-аппаратного комплекса, и при исследовании привода сканатора тепловизора.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:

1. Дубин А.Е., Шербин А.М., Гришко В.А. Линейный пьезоэлектрический двигатель с встроенными пьезоэлектрическими датчиками // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Труды Второй Международной конференции, в 7-ми т./ Под ред. И.Б.Федорова, К.С.Колесникова, А.О.Карпова. - М., 1994. - Т.6. - С. D-15.

2. Шербин А.М., Гришко В.А. Пьезоэлектрический двигатель с мультипликативными механизмами // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Труды Второй Международной конференции, в 7-ми т. / Под ред. И.Б.Федорова, К.С.Колесникова, А.О.Карпова. - М., 1994. - Т.6. - С. D-29.

3. Гришко В.А., Дубин А.Е., Шербин А.М. Пьезоэлектрические моторы и актуаторы // Международный Симпозиум по Перспективным

Электронным Технологиям: Тезисы Третьей Международной научной конференции.- М., 1995.- С. 17.

4. Ушаков В.И., Щербин А.М. Пьезокерамические электромеханические передачи, прецизионных силовых механизмов //Вестник МГТУ. Машиностроение.- 1996.- №2.- С.101-109.

Кроме того, получено положительное решение предварительной экспертизы и находится в стадии согласования формулы изобретения:

5. Заявка №94015456/25. Линейный пьезоэлектрический двигатель/ В.А. Гришко, А.Е. Дубин, А.М. Щербин.