

1561109

На правах рукописи

**Коваленко Валерий Анатольевич.**

**ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ ВРАЩЕНИЯ - КАК  
ЭЛЕМЕНТ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.**

Специальность: 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук.

Москва 1998

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом  
Университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель

- Заслуженный деятель науки  
и техники Российской Федерации,  
доктор технических наук,  
профессор Медведев В. С.

Официальные оппоненты

- доктор технических наук,  
профессор Лохин В.М.  
- кандидат технических наук  
Шацкий А.В.

Ведущее предприятие

- ЦНИИАГ

28 1999 г. на заседании  
Московском Государственном  
по адресу: 107005, г. Москва,

в библиотеке

1561109

199 г.

к.т.н. Максимов А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

### Актуальность темы.

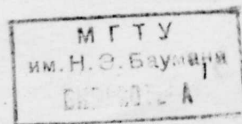
1561109  
Современные условия предъявляют высокие требования к автоматическому электроприводу. Существуют области техники, где требования по точности и быстродействию к таким системам велики. Ими являются оптические системы, системы видеонаблюдения, слежения и сканирования. При построении этих систем выясняется, что точность отработки воздействий определяется не только точностью датчика обратной связи, видом корректирующего устройства, порядком их астатизма и коэффициентом усиления, но и теми "малыми" ограничивающими факторами, которыми в грубых системах обычно пренебрегают. К таким факторам относятся точность изготовления передач редуктора, люфт, упругость, присутствие сухого трения и т.п. Величины параметров, отражающих эти факторы в большинстве случаев могут быть найдены только экспериментальным путем, т.к. определяются в основном технологией производства. Стоимость высокоточных приводов, при использовании обычных электромагнитных исполнительных элементов высока, и в большой степени определяется стоимостью примененных прецизионных механических передач. Одним из альтернативных решений является применение безредукторных приводов. В этом случае нужны исполнительные элементы, которые обеспечивают высокий момент, низкие скорости вращения и малое время переходного процесса. В качестве таких элементов могут выступать пьезоэлектрические двигатели вращения (ПДВ), изобретенные в СССР в начале семидесятых годов Лавриненко В.В. (иначе они называются вибродвигателями, а в зарубежной литературе - ultrasonic motors (USMs)). Это - устройства, преобразующие ультразвуковые колебания пьезоэлемента во вращательное движение. Такое преобразование осуществляется за счет механической нелинейности - силы сухого трения.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1561109

Коваленко В.А. Пьезоэлектр



ПДВ обладают следующими отличительными особенностями.

- Отсутствие обмоток с медным проводом, простота и технологичность конструкции, относительная дешевизна конструкционных материалов позволяют получить недорогой (при массовом выпуске) и сравнительно надежный электродвигатель.

- В соответствии с принципом действия ПДВ, из-за механического контакта толкателей с внутренней поверхностью ротора этот двигатель является самотормозящимся, т.е. при снятии питающего напряжения его ротор остается в заторможенном состоянии.

- Для ПДВ характерны низкие значения номинальной частоты вращения (20...200 об/мин) и относительно большие значения момента нагрузки на валу двигателя (до 1,5 нм).

- Конструкция ПДВ позволяет сравнительно просто выполнить его в защищенном исполнении, позволяющем эксплуатировать двигатель в специальных средах.

- ПДВ обладают малыми постоянными времени разгона и торможения (от долей до нескольких миллисекунд).

- ПДВ потенциально обладают высокой точностью позиционирования.

Эти вышеперечисленные особенности открывают хорошие перспективы использования ПДВ в высокоточных автоматических системах. Но, вместе с тем, известные модели, описывающие ПДВ, недостаточно полно отражают физические явления, происходящие в двигателе. Кроме того, недостаточная изученность характеристик двигателя, неполная информация о его параметрах не позволяют разрабатывать качественные устройства управления, обеспечивающие заданные свойства, что сильно сдерживает широкое использование ПДВ. Так как, в отличие от обычных двигателей, устройство управления является неотъемлемой частью ПДВ и во многом определяет свойства двигателя, то задача синтеза такого устройства - это по

существом задача проектирования двигателя. Для построения ПДВ необходим комплексный подход, в котором совмещаются знания электроники, теории управления и механики, что позволяет относить их к классическим *мехатронным элементам*.

В настоящее время изобретено большое количество конструкций ПДВ, но отечественных серийно выпускающихся двигателей, которые могут быть использованы в замкнутом автоматическом приводе, практически нет. Это объясняется в большой степени вышеизложенными фактами. На кафедре М7 МГТУ им. Н. Э. Баумана обратили внимание на двигатели типа ПД, которые в виде опытных партий выпускаются промышленностью. Эти двигатели в литературе иначе называют двигателями с выступающими прокладками (лепестками - толкателями), которые благодаря промежуточному упругому элементу относятся к стабильному типу двигателей. Но устройства управления, которые поставлялись с двигателями, и были построены на принципе автогенератора, не были предназначены для применения в замкнутом приводе и не обеспечивали необходимые требования для использования в автоматических системах. При экспериментальном исследовании и изучении литературы было выяснено, что электромеханическая часть этих двигателей, включающая пьезоэлемент и механический преобразователь колебаний во вращательное движение, обладает нелинейными характеристиками, зависящими от многих факторов, таких как температура, внешний момент, напряжение питания и т.п., что сильно затрудняет их использование. Кроме того, характеристики двигателя существенно зависят от реализации электронного устройства управления и примененных в нем способов модуляции электрического сигнала.

В связи с этим для получения удовлетворительных характеристик двигателя возникла необходимость разработки специализированных схем управления скоростью ПДВ.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование математической модели пьезоэлектрических двигателей вращения и методика проектирования устройств управления такими элементами для использования ПДВ в замкнутом автоматическом приводе.

Устройства управления ПДВ должны обеспечить выполнение следующего требования:

- система “двигатель - устройство управления” должна обладать однозначными и стабильными характеристиками близкими к линейным.

Данный подход позволяет строить следящие системы на основе ПДВ с помощью хорошо изученных классических методов теории линейных систем автоматического управления.

#### Задачи исследования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Уточнить основные характеристики ПДВ применительно к использованию их в автоматических системах.
- Разработать модель электромеханической части двигателя с точностью, требуемой для задачи синтеза устройства управления.
- Определить способы управления, обеспечивающие однозначные и стабильные характеристики ПДВ, близкие к линейным. На основе этих способов создать и обосновать методы синтеза устройств управления ПДВ для использования двигателей в составе автоматических систем.
- Определить класс автоматических систем, в которых целесообразно применять ПДВ.

#### Методы исследования.

При разработке модели пьезодвигателя были использованы методы пьезотехники, базирующиеся на использовании теории электрических цепей

и методов прямых электромеханических аналогий для замещения уравнений механики эквивалентными электрическими цепями. Исследование модели проведено с привлечением методов математического моделирования, теории автоматического управления и математической физики. Реализация устройств управления проведена на основе использования современных методов схемотехники проектирования электронных устройств. Программное обеспечение разработанного автором аппаратно-программного комплекса, позволившего получить экспериментальные характеристики ПДВ и провести исследование двигателей с устройством управления в составе замкнутых автоматических систем, проведено на основе современных методов объектно-ориентированного программирования, применяемых для построения систем реального времени.

**Научная новизна** работы состоит:

- в создании математической модели пьезодвигателей типа ПД, пригодной для синтеза устройств управления ПДВ и доступной для анализа;
- в создании методики идентификации параметров модели пьезодвигателя;
- в определении способов управления скоростью пьезодвигателя для построения устройств управления, предназначенных для использования в замкнутом следящем приводе;
- в разработке аналоговых и импульсных электронных регуляторов реализующих эти способы;
- в разработке цифровых и аналоговых корректирующих устройств, предназначенных для использования двигателя в составе замкнутых по положению и скорости автоматических систем.

**Практическая ценность.** Результаты работы дают возможность непосредственно использовать ПДВ типа ПД для создания высокоточных

автоматических систем. Разработанные устройства управления ПДВ доведены до функционально законченных печатных модулей, которые легко могут быть повторены. Аппаратно-программный комплекс, созданный в процессе работы над диссертацией может быть использован не только для исследования и испытания разнообразных мехатронных систем и их элементов, но и в учебном процессе для проведения различных практикумов по специальностям связанным с механикой, электроникой, автоматическим управлением, электроприводом и т.п.

Реализация и внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты, полученные в работе, использованы в НИР “НИИ СМ”, связанных с управлением поворотными устройствами систем телевизионного наблюдения мобильных роботов, и для создания “Универсального аппаратно-программного комплекса для исследования и испытания мехатронных систем”, разработанного на кафедре СМ7 МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с РОСУЧПРИБОРОм и МГТУ-Станкин. Внедрения подтверждаются соответствующими актами.

Апробация работы проводилась при обсуждении диссертационной работы на семинарах и конференциях МГТУ им. Баумана, и на Международной выставке “Учебная техника 96” проходившей в Нижнем Новгороде.

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 2 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 171 страниц состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст диссертации изложен на 140 страницах и иллюстрирован 84 рисунками.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность проблемы исследования, сформулированы цель и совокупность задач, решаемых в диссертации. Проведен обзор применяемых в настоящее время пьезодвигателей, уточнена их классификация и определено местоположение в ней рассматриваемых типов двигателей. Приведены принцип действия, особенности и конструкция пьезодвигателей типа ПД, как реверсивного так и нереверсивного вида. Определены методы исследования ПДВ, содержание которого раскрывается в последующих главах.

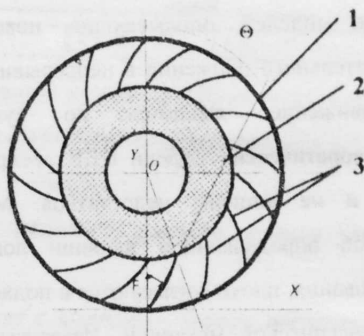


Рис. 1. Упрощенная конструкция пьезодвигателя вращения типа ПД.

1- ротор стальной полый стакан; 2- статор - аксиально поляризованный кольцевой цилиндрический пьезоэлемент; 3 - толкатели - стальные упругие пластинки. Реверсивный двигатель состоит из двух двигателей объединенных кинематической связью. Один из двигателей с пассивным ротором, а другой с активным.

Первая глава посвящена исследованию пьезоэлементов примененных в двигателях типа ПД.

Принцип действия пьезоэлектрических двигателей основан на применении пьезоэффекта. Поэтому глава I в первой части носит в основном справочный характер по описанию свойств пьезоматериалов. В последующих частях главы эти сведения конкретизируются и употребляются для

пьезоэлементов, использующихся в рассматриваемых типах двигателя. Приводится решение электромеханической задачи вынужденных колебаний пьезоэлемента и его электрическая схема замещения. Даются экспериментальные частотные характеристики пьезорезонатора, на основе которых проведена идентификация параметров схемы его замещения, и их сравнение с характеристиками схемы замещения. На основе полученной схемы замещения проводится анализ пьезоэлемента как звена с амплитудной модуляцией.

**Вторая глава** посвящена теоретическому исследованию двигателя как преобразователя колебаний во вращательное движение.

Большинство моделей, описывающих поведение ПДВ как преобразователя колебательного движения в непрерывное вращательное или поступательное движение, являются по существу эмпирическими. Существующие теоретические модели ПДВ воспроизводят закономерности лишь частично и не лишены недостатков. Модели, построенные на предположении об определяющем влиянии локальных деформаций на процесс преобразования, плохо согласуются с подходами, основывающимися на принципах классической механики. Известные модели, созданные на принципах классической механики, не учитывают взаимовлияние пьезоэлемента и механического преобразователя и разработаны для двигателей, работающих в основном на ударном принципе (косой удар). При этом они описывают поведение двигателя только для реактивных механических нагрузок. Кроме того, механические модели трудно совместить со схемой замещения пьезоэлемента, что требуется для анализа их взаимовлияния. С другой стороны, электрические схемы замещения, описанные в литературе, получены методом эквивалентного генератора, путем аппроксимации электрической цепью поведения механической части двигателя и построены на усредненных значениях механических величин,

таких как сила и скорость. Схема замещения описываемого во 2 главе преобразователя основана на замещении механической модели идеализированного преобразователя (рис.2) электрической цепью (рис.3) с помощью метода прямых электромеханических аналогий, что позволяет проводить исследования всего двигателя на основе теории электрических цепей.

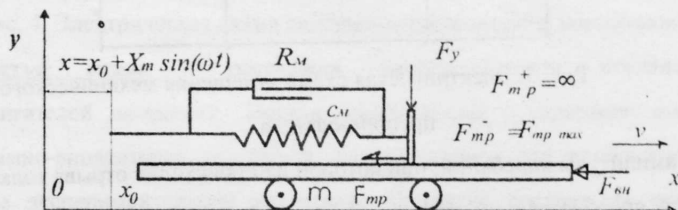


Рис. 2. Идеализированная модель преобразователя колебаний в поступательное движение.

Допущения принятые в модели.

- Частота механического резонанса намного меньше частоты колебаний статора.
- Пружина взаимодействует с выходным звеном посредством силы трения Кулона, т.е. сила трения движения не зависит от скорости и равна максимальной силе трения покоя.
- В положительном направлении сила трения бесконечна, а в отрицательном - конечная величина, определяемая коэффициентом трения и силой притяжения.
- Приведенная масса выходного звена к статору постоянна.
- Приведенная жесткость пружины постоянна и принята равной суммарной жесткости пластинок со стороны статора (в частотном диапазоне вынужденных колебаний статора);

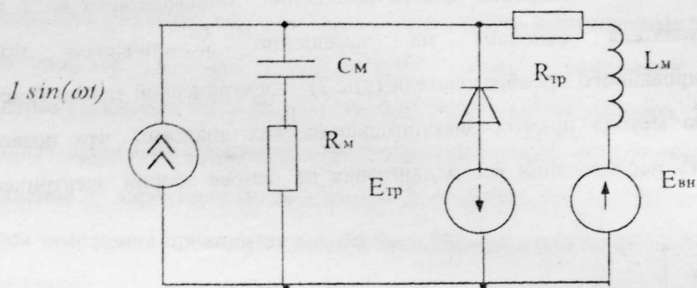


Рис. 3. Электрическая схема замещения механического преобразователя.

До амплитуды колебаний, при которой не происходит отрыва толкателей от ротора преобразователя представляет собой колебательное звено, а при превышении он выполняет функцию механического демодулятора. Т.к. при движении упругость демпфируется силой сухого трения, добротность колебательного звена при этом сильно снижается.

В главе приводятся характеристики преобразователя, полученные с помощью численного моделирования схемы замещения. Моделирование упрощенной схемы замещения механического преобразователя показало, что преобразователь на начальных участках обладает нелинейной зависимостью средней скорости выходного звена от среднеквадратичного значения скорости входного звена (нелинейности - зона нечувствительности и начальная параболическая зависимость), которые в дальнейшем переходят практически в линейные. Механические характеристики близки к линейным почти на всем участке и становятся нелинейными при внешней силе, совпадающей с направлением скорости и близкой к силе трения. При равенстве этих сил режим становится неустойчивым (двигатель идет в разнос). При отсутствии питания, преобразователь реверсивного двигателя представляет собой двухмассовый объект с двумя упругими связями, обладающий резонансными характеристиками (рис.4). Динамические

свойства ступеней, при работе такого двигателя, различаются из-за неравенства их моментов инерций.

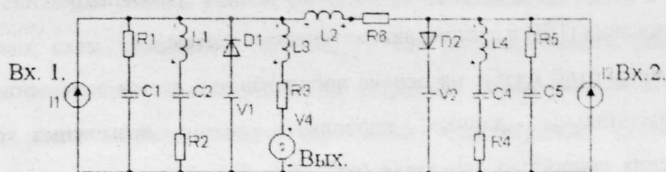


Рис. 4. Электрическая схема замещения реверсивного преобразователя.

**Третья глава** посвящена непосредственно исследованию пьезодвигателей вращения. Первая часть главы содержит описание программно-аппаратного комплекса, разработанного для использования в качестве экспериментальной установки. Комплекс состоит из активного нагрузителя, позволяющего задавать различные виды нагрузок, и аппаратного и программного обеспечения для получения и обработки информации. В главе приводятся графики экспериментальных характеристик ПДВ, полученные с помощью комплекса и проводится синтез модели ПДВ, основанный на анализе этих характеристик и теоретическом исследовании, проведенном в предыдущих главах. Модели ПДВ приводятся в виде электрических схем замещения и структурных схем звеньев ТАУ.

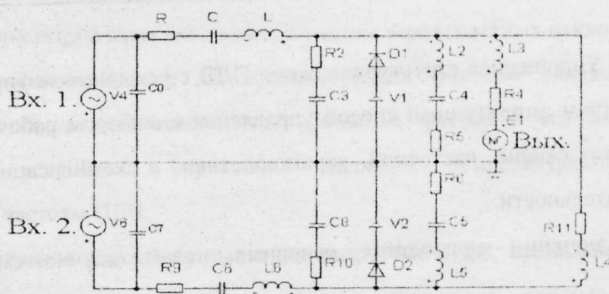


Рис. 5. Электрическая схема замещения реверсивного ПДВ.

На основе экспериментальных данных производится идентификация параметров этих схем и анализ полученных результатов на предмет использования ПДВ в составе автоматических систем.

В четвертой главе, на основе предложенной схемы замещения ПДВ и экспериментальных данных, проводится анализ возможных способов управления скоростью двигателя (способов формирования модулирующего сигнала). Приведено описание электронных устройств, выполненных автором и реализующих эти способы. Для этих устройств приводятся экспериментально полученные характеристики и упрощенные модели двигателя с устройством управления, необходимые для синтеза замкнутых систем управления. Приведены результаты исследования таких устройств управления в составе следящих систем, замкнутых по положению и скорости.

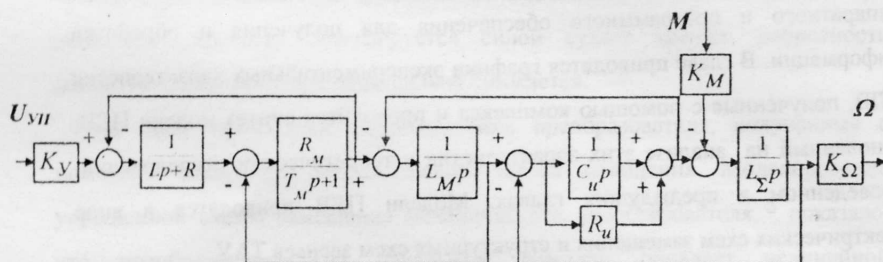


Рис. 6. Упрощенная структурная схема ПДВ с устройством управления, реализующим амплитудный способ управления с выбором рабочей точки на правом склоне частотной характеристики и компенсацией зоны нечувствительности.

В заключении приводятся основные новые научно-технические результаты.

1. Уточнена классификация ПДВ и определено местоположение в ней пьезодвигателей типа ПД.

2. Получена модель пьезоэлектрических двигателей типа ПД, предназначенная для синтеза систем управления. Модель приводится в виде электрических схем замещения, что важно для энергетического расчета двигателя и проектирования электронных устройств управления, и в виде структурных схем автоматического управления. Она отражает основные закономерности двигателя, т.е. зависимость характера статических и динамических характеристик двигателя от рабочей частоты, и позволяет провести анализ возможных способов управления скоростью ПДВ.

Теоретический анализ модели выявил ее ближайший механический аналог, известный из теории нелинейных систем - колебание массы на нелинейной мягкой пружине. Основное отличие от классического аналога, изменение коэффициента жесткости пружины в зависимости от амплитуды колебаний ограничено.

3. Разработана методика идентификации параметров модели ПДВ. Методика позволяет на основе экспериментальных и паспортных данных двигателя достаточно просто определить параметры схем замещения. При достаточно большом производстве двигателей, и условии накопления статистической информации по технологическому разбросу, возможно получение параметров схем замещения с учетом вероятностных отклонений.

4. Выявлены основные дестабилизирующие факторы влияющие на работу ПДВ. Было установлено, что основным фактором усложняющим реализацию устройства управления является температурный уход резонансной частоты ПДВ.

5. Определены способы управления скоростью ПДВ, предназначенные для использования двигателей в составе следящего привода. Было установлено, что для получения линейных регулировочных и жестких механических характеристик ПДВ возможно применение амплитудного способа управления с компенсацией зоны нечувствительности. Выбор

рабочей точки (частоты) при использовании этого способа должен осуществляться на правом склоне частотной характеристики ПДВ, снятой при работе двигателя в зоне нечувствительности. При выборе рабочей точки на левом склоне этой частотной характеристики наблюдается неустойчивая работа. Для полного использования скоростных свойств двигателя необходимо применять амплитудно-фазовые способы управления скоростью ПДВ с применением компенсации зоны нечувствительности. При эксплуатации двигателя в узком температурном диапазоне (от +15 до +45 С°) компенсация теплового ухода резонансных характеристик не нужна. Для более жестких температурных условий такая компенсация необходима. Ее легко осуществить используя датчик температуры корпуса двигателя.

6. Разработаны электронные устройства управления реализующие выше названные способы управления. Эти устройства были опробованы в составе автоматических систем замкнутых по положению и скорости. Устройства управления выполнены в виде функционально законченных печатных узлов.

#### **Выводы:**

Исследования ПДВ показали целесообразность их использования в быстродействующих высокоточных микромощных следящих приводах, предназначенных для управления малоинерционными объектами.

Теоретические и практические результаты, полученные в работе использованы в НИР "НИИ СМ", которые связаны с управлением поворотными устройствами систем телевизионного наблюдения мобильных роботов, и для создания "Универсального аппаратно-программного комплекса для исследования и испытания мехатронных систем", разработанного на кафедре СМ7 МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с РОСУЧПРИБОРОм и МГТУ-Станкин.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Коваленко В.А. Пьезоэлектрические двигатели в автоматических системах //Студенческая научная весна 94: Тез. докладов международной научно-технической конф. - М., 1994. - С. 115.

Кроме того находится в печати

2. Коваленко В.А., Орлов Г.А. Пьезоэлектрические двигатели вращения в автоматических системах. Конструкция и характеристики //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1999. № 1. - С. 53-59.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заказ № 218. Тираж 100 эк.

Дата подписания в печать 17.12.98 г. Объем 1 печ. лист.