

На правах рукописи

Крушин

КРУШИНСКИЙ Илья Александрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СХВАТА С
МИКРОПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ
И ОЧУВСТВЛЕНИЕМ

Специальность 05.02.05 – Роботы,
мехатроника и робототехнические системы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2008

Диссертация выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Смирнов Аркадий Борисович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Тисенко Виктор Николаевич

кандидат технических наук, директор
филиала ООО «Фесто-РФ» в Санкт-Петербурге
Знаменский Иван Сергеевич

Ведущая организация: ОАО «Реконд»

Защита состоится 27 января 2008 г. в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан _____ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.12

кандидат технических наук, профессор  Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Область микроманипулирования и микроробототехники все еще находится в своей начальной стадии развития, и промышленность сегодня ориентируется на создание микроманипуляторов и сборочных центров, предназначенных для решения конкретных задач.

Существует много типов схватов – электромеханические, гидравлические, пневматические, это схваты для разнообразных применений. Они оснащены различными датчиками и, как правило, специально разработаны под конкретные задачи. Многие из этих схватов имеют большие размеры и массу, что делает их непригодными для использования в составе мини- и микроманипуляторов и мобильных микророботов. Основная мотивация для проведения настоящего исследования состоит в отсутствии микроманипуляционных систем, необходимых для решения широкого спектра задач – от высокоточного монтажа поверхностно-монтируемых электронных компонентов в радиоэлектронике до сборки микромеханических устройств. Для сборки и монтажа микроустройств нужны микроманипуляторы с микрозахватными устройствами, которые могут обеспечить высокую точность и надежность позиционирования малых компонентов.

В данной диссертации исследуются возможности использования систем с пьезоэлектрическими приводами. Они обладают рядом важных достоинств, таких как высокая жесткость, точность, надежность, компактность. Теории пьезоэлектрических приводов посвящено большое число работ, в первую очередь следует отметить работы А. А. Ерофеева, А.Б. Смирнова, В. М. Шарапова, О. В. Даринцева, Р.Г. Джагупова, Р.А. Бараускаса, Х.С. Тзоу, Т. Фукуды, С. Фатикова, Р. Банинга. Однако, ввиду ряда причин, пьезоэлектрические приводы пока мало используются в робототехнике. Среди этих причин малое число работ по исследованию систем с пьезоэлектрическими манипуляторами и захватными устройствами, отсутствие методик и технологии изготовления таких устройств, а также систем и алгоритмов управления ими.

Микроманипуляторы с пьезоэлектрическими захватными устройствами не

обладают высокой конструктивной сложностью, принцип действия прост, но трудность представляет отсутствие научно обоснованных методик проектирования пьезоактюаторов пальцев схватов и построения систем управления. Подробный анализ на математических моделях и на реальных образцах пьезоэлектрических захватных устройств, как показывает литературный обзор, еще не проводился, вследствие чего тема диссертации является актуальной.

Целью работы является разработка и исследование пьезоэлектрического схвата, в котором благодаря изменению управляющего напряжения на пьезоэлектрических пальцах схвата можно реализовать точные перемещения захваченной детали без использования дополнительного привода.

Решение данной задачи основано на идее применения единого привода для осуществления захватывания и точных малых перемещений детали в схвате, что отличает предлагаемый схват от традиционной схемы схватов с отдельными приводами. Такой подход позволяет укоротить кинематические цепи и упростить конструкцию микроманипулятора. Также целью работы является разработка метода очувствления схвата для определения момента фиксации детали в схвате. Особое внимание в работе акцентируется на разработке электронной системы управления для применения схвата в виде мехатронного модуля в стационарной или мобильной мехатронной микроманипуляционной системе. В результате создания данного схвата повысится быстродействие, точность и надежность мехатронной микроманипуляционной системы.

В диссертации поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Сбор и анализ материалов по системам микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами, обзор методов исследования и анализ существующих математических моделей пьезоактюаторов.
2. Разработка принципов построения и математических моделей пьезоэлектрического схвата с микропозиционированием, создание методик его расчета и анализ работы предложенного схвата в квазистатическом и динамическом режимах.
3. Определение грузоподъемности схвата и аналитическое описание механики схвата с зажатой деталью.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 23.12.2008. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 271.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в типографии Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

с видео управлением. // Материалы конференций политехнического симпозиума: Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона. – СПб: 2006. – С. 126-127.

4. **Крушинский И.А.** Микропозиционная система на основе пьезоэлектрического схвата. // Материалы конференций политехнического симпозиума: Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона. – СПб: 2006. – С. 96-97.

5. **Крушинский И.А.** Мехатронный модуль пьезоэлектрического схвата с микропозиционированием. // Материалы Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых: Наука и инновации в технических университетах. – СПб: 2007. – С. 24-25.

6. **Крушинский И.А., Полищук М.Н., Смирнов А.Б.** Исследование пьезоэлектрического схвата с микропозиционированием. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Десятой Всероссийской научно-практической конференции. Т.5. Экстремальная робототехника. – СПб: 2007 г. – С. 393-400.

7. **Волков А.Н., Жавнер В.Л., Крушинский И.А., Смирнов А.Б., Смородов А.В., Смородов П.В.** Управление техническими системами. Лабораторный практикум по мехатронным системам: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 118 с.

8. **Крушинский И.А., Смирнов А.Б.** Микроконтроллерное управление пьезоэлектрическим захватным устройством //XXXVI неделя науки СПбГПУ: Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч-III. – СПб: изд-во СПбГПУ. – 2008. – С. 4-5.

9. **Крушинский И.А., Уланов В.Н., Смирнов А.Б.** Исследование пьезоэлектрического схвата с очувствлением. Труды 19-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Экстремальная робототехника. – СПб: 2008 – С. 409-415.

10. **Крушинский И.А.** Высоковольтный оптический ЦАП с USB-интерфейсом для управления пьезоэлектрическим схватом. Журнал “Вестник Электроники”, №2 (19) – 2008. – С. 8-11.

11. **Крушинский И.А.** Моделирование миниатюрного захватного устройства с пьезоприводом. //Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб: издание СПбГПУ; №4 (63). – 2008. – С. 126-132. (Журнал из списка ВАК)

4. Разработка макета и проведение экспериментальных исследований для проверки математических моделей.

5. Определение гистерезисной, динамической и температурной погрешностей пьезоэлектрического схвата.

6. Разработка метода очувствления схвата путем использования пальцев схвата в режиме датчика наличия детали в схвате.

7. Разработка алгоритмов управления схватом.

8. Разработка мехатронного модуля, включающего схват и электронную систему управления схватом.

9. Оптимизация массогабаритных характеристик системы управления напряжением питания схвата для возможности его применения в мобильных микроманипуляционных системах.

Методы исследования. Кинематические, силовые и динамические параметры схвата исследовались с использованием методов сопротивления материалов, теории колебаний, физики упругих пьезоэлектрических сред. Для проверки теоретических положений математической модели применялся натурный эксперимент. Вследствие того, что на миниатюрном схвате сложно установить датчики для экспериментального исследования работы схвата в составе мехатронной системы, для контроля микроперемещений использовался телевизионно-микроскопический комплекс МБС-10 и телеуправление.

При построении графиков использовался пакет MathCAD 2003. Для проведения частотного анализа использовалось математическое моделирование при помощи программы Cosmos пакета SolidWorks. При разработке программы системы управления использован язык программирования С в среде IAR Embedded Workbench.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Получено уточненное решение дифференциального уравнения линии прогиба пьезоэлектрического биморфа пальца схвата.

2. Разработана математическая модель распределенной эквивалентной нагрузки, обеспечивающая большую точность расчета линии прогиба свободного пальца

схвата, чем методика постоянного эквивалентного момента.

3. Получены формулы для расчета силы зажима детали, грузоподъемности и допустимого ускорения движения схвата с деталью, а также формула для расчета перемещения при микропозиционирования детали в схвате.

4. Показано, что эффективным способом частотного очувствления схвата является разделение цепей привода и датчика, когда один из пальцев схвата служит источником сигнала и приводом, а второй – датчиком и включен в измерительную цепь.

5. Доказано, что термодрейф не влияет на точность микропозиционирования в поперечном направлении, но оказывает влияние на силу, развиваемой пальцем схвата.

Практическая ценность работы:

1. Предложены и обоснованы методики расчета пьезоэлектрического захватного устройства.

2. Разработан действующий макет пьезоэлектрического схвата.

3. Оптимизирована электронная система управления схватом для использования его в стационарных и встраиваемых мобильных системах.

4. Разработан и исследован высоковольтный оптический ЦАП для цифрового управления пьезоэлектрическим биморфным актюатором пальца схвата.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях СПбГПУ в 2006 и 2007 г., на семинарах кафедры «Автоматы» и в ЦНИИРТК, а также в ЛЕНЭКСПО на международной научно-технической выставке "Мехатроника и Робототехника" (МиР-2008). По результатам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. В объем диссертация входят: основной текст на 162 страницах, 160 рисунков на 80 страницах, 14 таблиц на 8 страницах и список литературы из 224 наименований.

ний и экспериментальный способ определения коэффициента чувствительности датчика.

4. Разработан макет и экспериментально исследованы статические и динамические характеристики схвата, а также различные способы использования пальцев схвата в качестве датчика наличия детали в схвате. Показано, что наиболее эффективным способом очувствления схвата без специальных датчиков является разделение цепей привода и датчика, когда один из пальцев схвата является источником сигнала и приводом, а второй выполняет функцию датчика и включен в измерительную цепь.

5. Экспериментально показано, что при зажатии детали и последующем микроперемещении петля гистерезиса уменьшается в 4 раза.

6. На основе полученных математических моделей разработаны алгоритмы управления пьезоэлектрическим схватом, реализующие захватывание, манипулирование, микропозиционирование детали и частотное очувствление схвата.

7. Предложена архитектура и схемотехника системы цифрового управления схватом в дорезонсном режиме. Система оптимизирована для управления пьезосхватом в мобильных системах и беспроводных устройствах с автономным питанием.

8. Для управления напряжением на выходе системы питания использован разработанный автором высоковольтный оптический ЦАП. Найден способ его включения, при котором характеристика преобразования становится линейной и аналогичной монотонному ЦАП.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Крушинский И.А., Бойцов А.Ю., Смирнов А.Б.** Пьезоэлектрические приводы для микроботов. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Девятой Всероссийской научно-практической конференции. Т.5. Экстремальная робототехника. – СПб.: 2006. – С. 525-531.

2. **Крушинский И.А., Смирнов А.Б.** Анализ приводов для мобильных микро и мини робототехнических систем. // Материалы семинаров политехнического симпозиума: Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона. – СПб: 2005. – С. 106-107.

3. **Крушинский И.А., Смирнов А.Б.** Пьезоэлектрическое захватное устройство

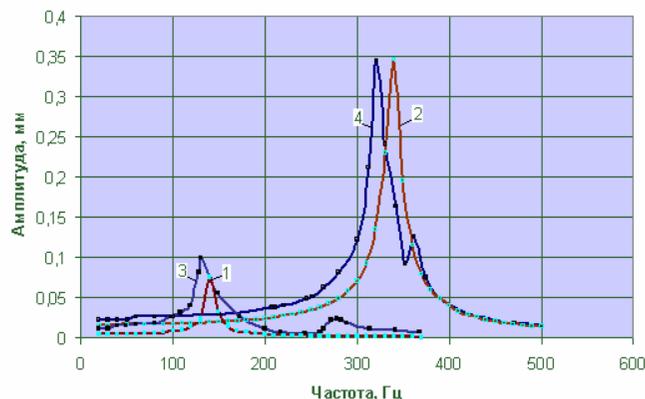


Рис.6 Сравнение теории и экспериментальных данных: 1 и 2 – расчетные графики; 3 и 4 – графики, полученные по результатам эксперимента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертации теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие основные результаты:

1. Решена актуальная научно-техническая задача, состоящая в разработке принципов построения конструкций мини- и микрозахватных пьезоэлектрических устройств без дополнительного привода микроперемещений с лучшими массогабаритными и точностными характеристиками по сравнению с известными схватами.
2. Разработаны математические модели, позволяющие определить перемещения свободного пальца схвата, силу сжатия и грузоподъемность схвата, а также перемещение при микропозиционировании детали в квазистатическом режиме. Предложена методика расчета пьезоэлектрического схвата с микропозиционированием. Результаты расчетов по математическим моделям подтверждены экспериментально.
3. Адаптирована и получила дальнейшее развитие электромеханическая модель пьезоактюатора в применении к схвату, позволяющая получать расчетные АЧХ для различных случаев колебаний пальцев схвата с деталью и без нее. Показано, что при захватывании детали амплитуда вынужденных колебаний уменьшается в 4 раза и резонанс смещается в сторону понижения частоты, что предложено использовать для частотного очувствления схвата. Согласно данной модели разработана методика расчета ЭДС пальца датчика в зависимости от частоты колеба-

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена область исследования, сформулирована цель и задачи исследования, показаны научная новизна работы и ее практическое значение, дан обзор содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу известных принципов построения мини и микрозахватных пьезоэлектрических устройств. Приведен обзор литературы по проектированию и расчету схватов, указаны существующие их классификации. Сделан обзор публикаций и патентов по пьезоэлектрическим схватам с указанием их технических характеристик. Составлена классификация известных конструкций пьезоэлектрических схватов. Дана оценка преимуществ и недостатков использования пьезоэлектрических актюаторов в составе схвата. Выявлено, что известные двухпальцевые схваты с пьезоэлектрическим приводом выполняют только функции захвата и удержания детали, не исследовано микропозиционирование детали в схвате и пальцы схвата не являются частью системы очувствления.

Выполнен обзор мехатронных систем точного позиционирования и показаны области применения пьезоэлектрических схватов. Приведены характеристики систем точного позиционирования и описание системы управления пьезоэлектрическим приводом на примере системы управления струйным принтером.

В последней части первой главы сделан аналитический обзор методов исследований на основе научных публикаций и диссертаций, связанных с темой данной диссертации. Диссертаций по пьезоэлектрическим схватам не было выявлено, но было проанализировано большое число работ, посвященных изучению пьезоэлектрических актюаторов для систем микроперемещений. Исходя из нерешенных научных проблем, относящихся к теме диссертации, сформулированы отдельные задачи данной работы.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию математических моделей

двухпальцевого пьезоэлектрического схвата. Рассматриваются два режима работы схвата – квазистатический и динамический. В квазистатике посредством математической модели пальца схвата определяются величины прогиба по различным методикам и сила, создаваемая им в зависимости от напряжения питания.

Данная модель включает в себя следующие формулы:

- постоянный эквивалентный момент:
$$M_{\vartheta}(E_3) = b \cdot \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \cdot E_3 \cdot h_p^2; \quad (1)$$

- радиус кривизны:
$$R(U) = \frac{3}{2} \cdot \frac{h_p^2}{d_{31} \cdot U}; \quad (2)$$

- угол поворота сечения:
$$\theta(x, R) = \arcsin\left(\frac{x}{R}\right), \quad x \in [0; L]; \quad (3)$$

- решение уравнения прогиба:
$$\xi(R, \theta) = R \cdot (1 - \cos \theta) = 2 \cdot R \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}; \quad (4)$$

- эквивалентная распределенная нагрузка:
$$q_{\vartheta}(U) = \frac{2 \cdot b \cdot h \cdot d_{31}}{L^2 \cdot s_{11}^E} \cdot U; \quad (5)$$

- прогиб от эквивалентной нагрузки:
$$\xi(U, x) = \frac{12 \cdot d_{31} \cdot U}{L^2 \cdot h^2} \cdot \left(\frac{L^2 \cdot x^2}{2} - \frac{L \cdot x^3}{3} + \frac{x^4}{12} \right). \quad (6)$$

Обозначения в формулах (1) – (6): d_{31} – пьезоэлектрический модуль, Кл/Н; s_{11}^E – податливость пьезокерамики, Па⁻¹; U – электрическое напряжение, В; E_3 – напряженность электрического поля, В/м; h_p – половина толщины пальца схвата, м; h – толщина пальца схвата, м; L – длина пальца схвата, м; b – ширина пальца, м.

Отличие модели прогиба пальца схвата для эквивалентной распределенной нагрузки от метода эквивалентного момента в том, что кривизна прогиба биморфа пальца схвата считается непостоянной величиной.

Решение уравнения прогиба пальца схвата найдено в параметрическом виде в полярной системе координат при условии постоянной кривизны. Расхождение метода эквивалентного момента и данного решения не превышает 8 % при длине биморфа меньшей, чем радиус кривизны.

Далее в этой главе построены линии прогиба пальца схвата для различных методик расчета и различных значений внешней блокирующей силы $F_{\text{бл}}$, приложенной на его конце со стороны детали. Далее в квазистатике разработана математическая модель схвата с зажатой в нем деталью, и определены величины силы сжатия детали, микропозиционирования и грузоподъемности схвата. Расчетная

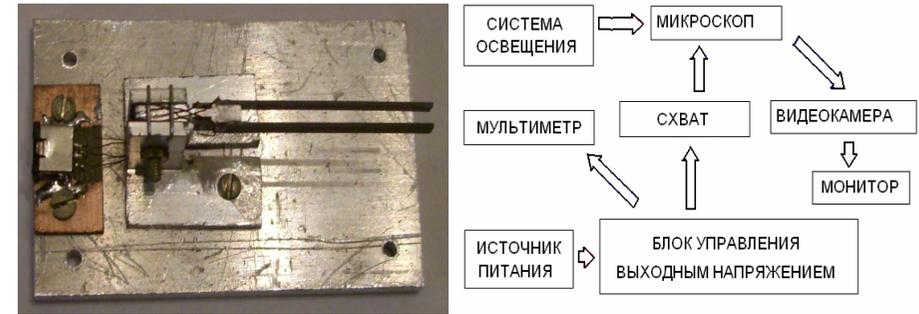


Рис. 5 Пьезоэлектрический схват и блок-схема экспериментального стенда

В рамках экспериментального исследования пьезоэлектрического схвата были проведены три группы экспериментов:

1. Квазистатический режим работы схвата: а) захват детали; б) микропозиционирование; в) измерение силы создаваемой пальцем схвата; г) определение величины прогиба и гистерезиса пьезопроводов пальцев схвата.
2. Динамический режим работы схвата: а) определение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) свободного пальца схвата; б) АЧХ схвата при наличии зажатой детали в схвате; в) АЧХ схвата, находящегося под действием внешней силы.
3. Эксперименты по очувствлению схвата: а) включение схвата в цепь автогенератора; б) использование пальца-датчика для приема сигнала прямоугольной формы; в) определение резонансной частоты пальца датчика в схвате без детали; г) снятие АЧХ датчика схвата с деталью; д) использование пальца привода в качестве датчика; е) включение датчика режиме пьезотрансформатора.

На рис. 6 показано сравнение теоретических и экспериментальных АЧХ пальца привода для частотного очувствления схвата. При захвате детали амплитуда колебаний уменьшается, и резонанс смещается в сторону понижения частоты. Один из неожиданных результатов исследования был получен в экспериментах по исследованию частотных характеристик схвата: на АЧХ пальца привода обнаружен локальный минимум в точке резонанса пальца датчика (рис. 6, график 4). Объяснение данного эффекта приведено в диссертации.

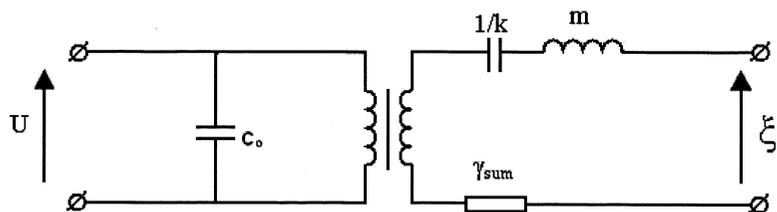


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения пальца схвата

Данная модель включает в себя следующие формулы:

- уравнение вынужденных колебаний: $m_s \cdot \ddot{\xi} + \gamma_{sum} \cdot \dot{\xi} + k \cdot \xi = k \cdot \xi_{mx} \cdot \cos(\omega \cdot t);$ (12)

- частное решение уравнения (12) для частоты резонанса: $\xi(t) = \frac{\xi_{mx} \cdot k}{\gamma_{sum} \cdot \omega_0} \cdot \sin \omega_0 t;$ (13)

- амплитуда колебаний пальца схвата: $A(\omega) = \frac{\xi_{mx} \cdot \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega^2 \cdot \omega_0^2}{Q_d^2}}};$ (14)

- ЭДС пальца схвата в режиме датчика: $U(\omega) = \frac{4}{3} \cdot \frac{A(\omega) \cdot h_p^2}{d_{31} \cdot L^2} \cdot K_{TRANS}.$ (15)

Обозначения в формулах (16) – (19): ξ – величина прогиба пальца схвата при напряжении U , м; m_s – приведенная масса биморфов пальцев схвата и детали, кг; γ_{sum} – коэффициент внутренних потерь пьезоэлектрического биморфа, кг/с; ξ_{mx} – амплитудное значение перемещения пальцев схвата при напряжении U_{mx} , м; ω_0 – резонансная частота, рад⁻¹; t – время, с; Q_d – механическая добротность пьезокерамики; K_{TRANS} – коэффициент чувствительности датчика, определяемый экспериментально; C_0 – статическая емкость биморфа, Ф.

В рамках данной модели были изучены случаи колебаний свободных пальцев схвата, колебаний пальца схвата под действием внешней силы, схвата с деталью при синхронном колебании двух пальцев схвата, и схвата с деталью при колебании только одного из пальцев схвата. Найдены смещения и величины АЧХ пальцев схвата для данных случаев.

Далее во второй главе для дорезонансной области частот разработана математическая модель разомкнутой системы цифрового управления микропозициони-

рованием пальца схвата (рис.3), она представлена уравнением:

$$m \cdot \ddot{\xi} + \gamma_{sum} \cdot \dot{\xi} + k \cdot \xi = F_0 + n \cdot F_i, \quad (16)$$

где F_i – сила, создаваемая пальцем схвата на одну единицу цифрового кода; n – это цифровой код коэффициента усиления K ; F_0 – любая возможная постоянная сила действующая на схват.

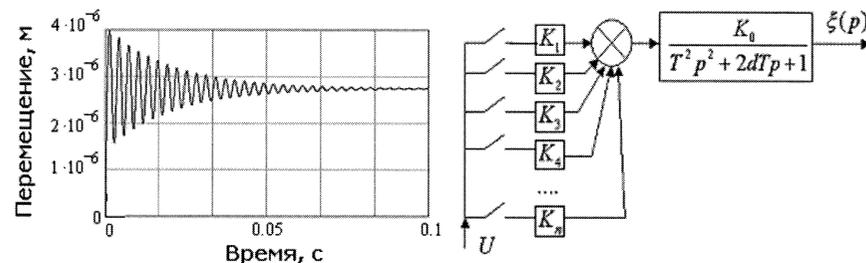


Рис. 3 Переходная характеристика и структурная схема системы управления микропозиционированием пальца схвата, путем регулировки напряжения питания

В конце второй главы рассмотрена проблема термодрейфа. Установлено, что коэффициент теплового расширения не влияет на величину поперечного перемещения концов пальцев схвата.

В третьей главе разработаны алгоритмы управления пьезоэлектрическим схватом в составе робототехнической двухкоординатной системы: 1) захват и удержание детали; 2) микропозиционирование и очувствление схвата по напряжению питания; 3) отпускание детали; 4) частотное очувствление захватного устройства. Далее в данной главе осуществлена разработка системы цифрового управления напряжением питания для мехатронного модуля пьезоэлектрического схвата в составе стационарной, мобильной или переносной робототехнической системы, она включает в себя решение следующих задач:

- обзор существующих преобразователей напряжения и разработка компактного высоковольтного малопотребляющего преобразователя напряжения питания;
- обзор известных видов ЦАП и разработка высоковольтного ЦАП для управления уровнем напряжения на схвате;
- анализ возможных способов использования пальцев схвата в качестве датчи-