

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,  
ՄՇԱԿՈՒՑԹԻ ԵՎ ՄՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԳԱԼՈՅԱՆ ՀՐԱՅՐ ԱԼԲԵՐՏԻ

ՄԱԿՐՈ ԵՎ ՄԻԿՐՈԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐՈՎ ՀԻԲՐԻԴԱՅԻՆ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՑԻՈՆ  
ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ՄԻՆԹԵԶԸ, ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ  
ԵՎ ՕՊՏԻՄԱԼ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ

Ե.02.01 – «Մեքենագիտություն» մասնագիտությամբ տեխնիկական  
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2023

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА  
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

ГАЛОЯН ГРАЙР АЛЬБЕРТОВИЧ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ С  
МАКРО- И МИКРОСТУПЕНЯМИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.02.01 – “Машиноведение”

ЕРЕВАН 2023

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի (ՀԱՊՀ) գիտական խորհրդում:

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.թ. Միքայել Գուրգենի Հարությունյան  
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Միհրան Գրիգորի Ստակյան  
Ֆ-մ.գ.թ. Սամվել Հակոբի Զիլավյան  
Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Մեխանիկայի ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2023 թ. հոկտեմբերի 10-ին, ժամը 13.00-ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող ԲՈԿ-ի «Մեքենաշինություն և մեքենագիտություն» 034 մասնագիտական խորհրդի նիստում, հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2023 թ. օգոստոսի 30-ին:

034 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,  
տեխն. գիտ. թեկնածու



Մ.Գ. Հարությունյան

---

Тема диссертации утверждена Ученым советом Национального политехнического университета Армении.

Научный руководитель:

к.т.н. Микаел Гургенович Арутюнян

Официальные оппоненты:

д.т.н. Мигран Григорьевич Стакян

к. ф-м.н. Самвел Акопович Джилавян

Ведущая организация:

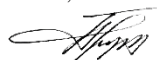
Институт механики НАН РА

Защита состоится 10-го октября 2023 г. в 13<sup>00</sup> ч. на заседании Специализированного совета 034 – ВАК “Машиностроение и машиноведение”, действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 30-го августа 2023г.

Ученый секретарь Специализированного совета 034,  
канд. техн. наук



М.Г. Арутюнян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современный технический прогресс сопровождается расширением применения роботизированных устройств в микроэлектронике, микробиологии, микрохирургии и других ведущих областях, что создает потребность в повышении точности и увеличении рабочего пространства манипуляционных систем.

Традиционные макроманипуляторы имеют большое рабочее пространство, высокое быстродействие, но по точности часто не соответствуют техническим требованиям перечисленных выше областей. В случае микроманипуляторов, наоборот, обеспечивается высокая точность, но рабочее пространство и быстродействие существенно ограничивают возможности их применения.

Предлагаемые гибридные манипуляционные системы с макро- и микро ступенями сочетают в себе большое рабочее пространство и быстродействие макроманипуляторов с высокой точностью микроманипуляторов и компенсируют недостатки друг друга, значительно расширяя их возможности и области применения.

Таким образом, проблемы структурного синтеза, моделирования и оптимального проектирования гибридных манипуляционных систем с макро- и микро ступенями актуальны для бурно развивающихся в настоящее время областей: микрохирургии, микроэлектронного производства и микробиологических исследований, выполняемых с использованием искусственного интеллекта и прецизионной роботизированной техники.

**Цель и задачи исследования.** *Целью диссертационной работы является разработка методов структурного синтеза, моделирования и оптимального проектирования гибридных манипуляционных систем с макро- и микро ступенями, их конструктивных компонентов, а также создание прототипа (тест-модели) прецизионного гибридного двухступенчатого поступательно-направляющего микроманипулятора.*

В соответствии с поставленной целью сформулированы основные задачи исследования:

- анализ функциональных и структурных требований к гибридным манипуляционным системам с макро- и микро ступенями и уточнение объектов исследования;
- выбор целесообразных структур гибридных манипуляционных систем и предложение новых решений путем сравнительного анализа известных решений для макро- и микро ступеней;
- исследование и разработка конструкций упругих кинематических пар и других компонентов прецизионных гибридных манипуляционных систем с макро- и микро ступенями;
- структурный синтез гибридных манипуляционных систем путем сочетания макро- и микро ступеней, с учетом характеристик и преимуществ каждой из них;
- кинематическое и динамическое моделирование проектируемой гибридной манипуляционной системы аналитическим методом и методом компьютерного моделирования;
- создание прототипа (тест-модели) прецизионной гибридной манипуляционной системы с поступательно-направляющими макро- и микро ступенями.

**Методы исследования.** Использованы методы теории механизмов и машин, механики, вычислительной математики, а также методы компьютерного моделирования механизмов с использованием программных средств DS SOLIDWORKS, ANSYS и MathCad.

**Научная новизна работы.** В процессе исследования были получены следующие основные результаты, отличающиеся новизной:

1. Предложена методика изготовления, экспериментального и компьютерного моделирования упругих шарниров с использованием современных технологий и материалов. На основании полученных результатов и их сопоставления получены конструкции, отличающиеся новизной.

2. Предложен усовершенствованный метод моделирования параллельных манипуляторов, который использован для синтеза и определения кинематических и динамических характеристик гибридных манипуляционных систем с макро- и микро степенями предложенной структуры.
3. Предложены новые упругие шарниры и кинематические цепи с улучшенными характеристиками, на базе которых осуществлен структурный синтез нового поступательно-направляющего микроманипулятора семейства Триптерон, существенно улучшающий точность поступательного движения выходной платформы микроманипулятора.

***Практическая ценность работы.*** Совершенствование методов моделирования и исследования гибридных манипуляционных систем с макро и микро степенями, традиционными и упругими шарнирами, шаговыми и пьезоэлектрическими приводами закладывает основу для проектирования и разработки устройств нового поколения, обеспечивающих улучшенные технические характеристики, востребованные в микроэлектронике, микробиологии, микрохирургии и в других областях науки и техники.

Анализ результатов структурного синтеза параллельных микроманипуляторов и численного решения задач оптимального проектирования показал эффективность разработанных алгоритмов, методологии их реализации и возможность их дальнейшего использования для решения подобных задач применительно к другим робототехническим устройствам

Разработан прецизионный параллельный микроманипулятор с тремя степенями свободы, который содержит предложенные автором новые конструктивные элементы: упругие шарниры, пьезоэлектрические приводы. Получено положительное решение на авторское право РА на изобретение по заявке АМ20230042У.

Диссертационная работа выполнена на кафедре Механики и Машиноведения и в научно-исследовательской лаборатории “Робототехника” НПУА в соответствии с планами исследовательских работ на 2020-2023 гг.

***Основные положения, выносимые на защиту:***

1. Усовершенствованный метод численного моделирования модифицированных и улучшенных конструкций упругих шарниров методами конечных элементов и 3D-печати.
2. Предложенная методика разработки и моделирования новой конструкции прецизионного микроманипулятора семейства Триптерон с упругими шарнирами и пьезоэлектрическими приводами.
3. Разработанная и использованная в диссертации методика структурного синтеза, кинематического и динамического моделирования гибридных манипуляционных систем с макро- и микро ступенями.

***Апробация работы.*** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на: 29-й Международной конференции “Машиностроение и техносфера XXI века” (г. Севастополь, 2022 г.); ежегодных научных конференциях НПУА (2020 - 2023 гг.); научных семинарах факультета “Машиноведение” НПУА (2020-2023 гг.).

***Публикации.*** Основные результаты исследования опубликованы в шести (6) научных статьях и получен один патент РА, список которых представлен в конце автореферата.

***Структура и объем работы.*** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 109 наименований. Общий объем диссертации составляет 111 страниц. Диссертация написана на армянском языке.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

***Во введении*** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ научно-технической литературы. Изучены различные структурные методы и методы управления для точного и эффективного решения задач манипулирования как на макро-, так и на микроуровне. Гибридные технологии имеют растущий потенциал в таких областях, как микроэлектроника, микробиология, микрохирургия, и других ведущих областях. Одним из основных результатов анализа литературы является возможность интеграции характеристик макро- и микроманипуляторов. Эта интеграция позволяет решать задачи, требующие как высокой точности на микроуровне, так и больших перемещений на макроуровне.

Анализ литературы показал, что для выполнения движений с высокой точностью и скоростью в рабочем диапазоне микроманипуляторов в качестве актуаторов целесообразно использовать пьезоэлектрические приводы, поскольку они точно следуют за изменением напряжения управляющего тока и практически безинерционны.

Таким образом, теоретическая и практическая значимость сформулированных в диссертации задач обоснована изучением исследований и разработок, посвященных теории проектирования и техническим решениям гибридных макро- и микроманипуляторов.

**Во второй главе** проведены анализ и сравнение механических характеристик одноподвижных упругих шарниров, а также шарниров с двумя степенями свободы различной геометрии с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Для того, чтобы шарниры были сопоставимы друг с другом, были выполнены действия по их модификации. Исследованы традиционные одноподвижные упругие шарниры с прямоугольными канавками разных размеров. Представлено изготовление упругих шарниров новым методом и выполнен их анализ. Проведены экспериментальные и конечно-элементные анализы напечатанных на 3D-принтере упругих шарниров с различной структурой. Проведены исследования прецизионных упругих шарниров типа “Бабочка”, предназначенных для использования в прецизионных механизмах, таких как оборудование, в областях медицины, космической техники и микроэлектроники. В предельном положении угла сгибания шарнира движение его ограничено, что предохраняет его от разрушения. Экспериментальные (рис. 1) и КЭА (рис. 2) проводились для различных модификаций упругого шарнира типа “Бабочка”. Различные факторы, влияющие на жесткость шарниров, были

определены с использованием метода конечных элементов (таблица). Для экспериментального определения жесткости модифицированных моделей был использован метод 3D-печати (FDM).

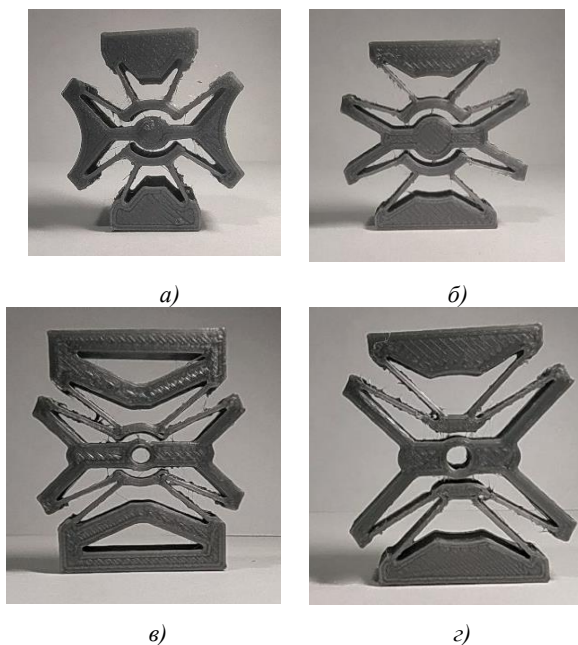
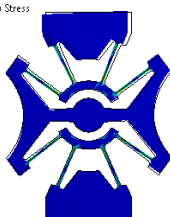
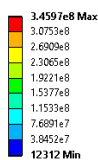


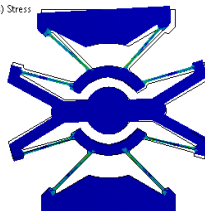
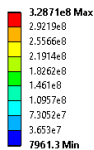
Рис. 1. 3D-печатные модели модифицированных упругих шарниров типа “Бабочка”:  
 а – первая модель, б – вторая модель, в – третья модель, г – четвертая модель

A: Static Structural  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: Pa  
 Time: 1  
 4/11/2020 6:51 PM



а)

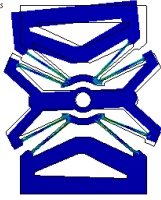
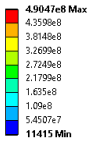
A: Static Structural  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: Pa  
 Time: 1  
 4/21/2020 4:55 PM



б)

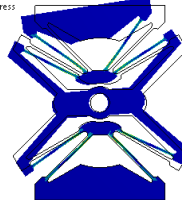
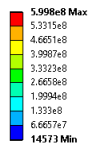


A: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1  
4/1/2020 7:21 PM



в)

A: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1  
4/2/2020 5:03 PM



г)

Рис. 2. КЭА модифицированных моделей упругого шарнира типа “Бабочка”: а – первая модель, б – вторая модель, в – третья модель, г – четвертая модель

Таблица. Исходные данные и результаты МКЭ

Название	Угол между вертикальными ветвями °	Угол между горизонтальными ветвями °	Момент, Нм	Угол наклона, °	Угловая жесткость, Нм/рад	Максимальное напряжение, (по Мизесу) МПа
Первая модель	47.6	102.4	0.5	2.41	11.89	346
Вторая модель	90	30	0.5	1.86	9.55	329
Третья модель	100	50	0.5	5.66	5.06	490
Четвертая модель	90	60	0.5	8.82	3.25	600

**В третьей главе** для исследуемых систем манипулирования определены области применения и вытекающие из них оценки эффективности, геометрические, кинематические и динамические критерии. Для решения проблемы точности, когда традиционные шарниры заменяются упругими, предложена новая структура микроманипулятора с упругими шарнирами, на основе механизма Триптерон (рис. 3). Новая структура предполагает добавление дополнительных кинематических цепей симметрично для каждой ноги, что приводит к шести ногам и обеспечивает четкие поступательные движения. Предложенная структура значительно улучшает

проблему нежелательных вращательных движений рабочего органа. Для проверки эффективности новой структуры выполнен анализ методом конечных элементов с использованием программы ANSYS. Показано, что уровни напряжения и деформации находятся в пределах допустимых значений для используемого материала, а симуляции продемонстрировали способность нового разработанного устройства выполнять точные задачи манипулирования. Осуществлен процесс синтеза гибридной манипуляционной системы, определены количество степеней свободы, типы звеньев и кинематических пар и форма соединения в кинематической цепи, входные параметры, критерии и ограничения синтеза.

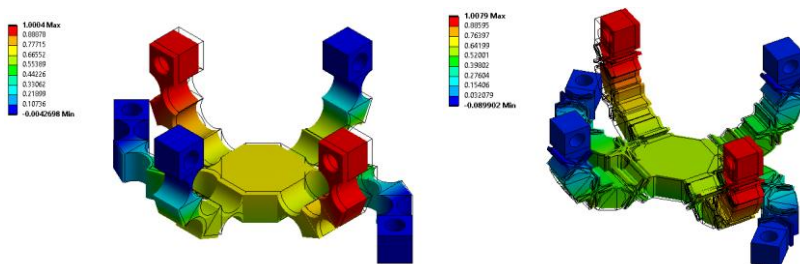


Рис. 3. Новая структура микроманипуляторов с упругими шарнирами на основе механизма Триптерон

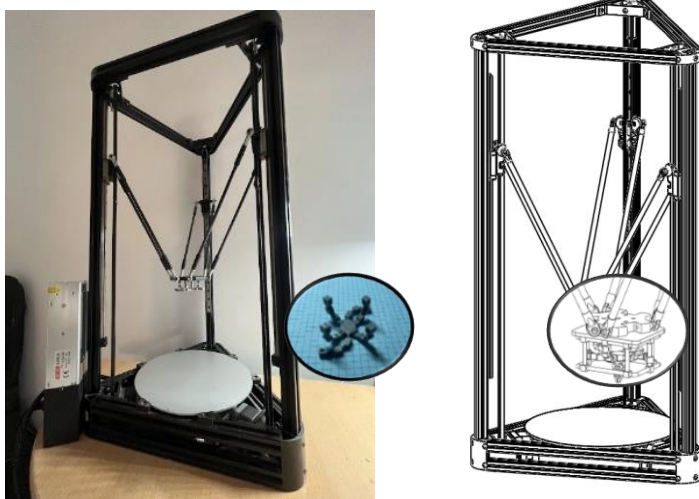
Для получения предлагаемой конструкции гибридной манипуляционной системы проведена интеграция модифицированного микроманипулятора типа Триптерон, оснащенного пьезоэлектрическим подвижным микрозахватом, и макроманипулятора типа Дельта.

**В четвертой главе** представлены кинематический и динамический анализы микроманипулятора типа Триптерон, динамическое моделирование, в частности, составлены уравнения для определения положений, скоростей и ускорений. Использование указанных уравнений и матриц преобразований позволяет точно определять положения выходной площадки манипулятора. Решением прямой и обратной задач кинематики определяется взаимосвязь между положениями шарниров и выходного звена, что позволяет также эффективно решать задачи управления.

Для расчета рабочего пространства и грузоподъемности рассматриваемых манипуляторов методом конечных элементов были получены характеристики манипуляторов. Для макроступени рабочее пространство имеет вид цилиндра диаметром 230 мм и высотой 261 мм, площадью основания  $41,548 \text{ мм}^2$  и рабочим объемом  $10844,028 \text{ мм}^3$  или  $10,844 \text{ см}^3$ . Для микроступени рабочее пространство представляет собой прямоугольную призму размерами  $1,25 \times 0,78 \times 1,48 \text{ мм}$ , объем которой  $1,443 \text{ мм}^3$ .

**В пятой главе** в результате оптимального проектирования улучшены характеристики упругих шарниров: радиус кругового сечения и толщина шейки и рабочий объем микроступени увеличен почти на 20%.

Выполнена разработка макета гибридной манипуляционной системы с макро- и микроступенями (рис. 4). Для макроступени изготовлен действующий прототип, а для микроступени, в связи с отсутствием пьезоэлектрических приводов и соответствующих технологий изготовления, в лабораторных условиях изготовлен макет-прототип с использованием 3D-принтера.



*Рис. 4. Прототип-макет и структурная схема гибридной манипуляционной системы с макро- и микроступенями*

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ современной литературы показал растущую роль и востребованность гибридных манипуляционных систем с макро- и микро ступенями в решении современных задач микротехнологий. Показано, что исследуемые гибридные манипуляторы имеют большой потенциал практических приложений в таких областях, как микроэлектроника, микробиология, микрохирургия. Сочетание возможностей макро- и микроманипуляторов в единой гибридной системе позволяет решать комплексные задачи, требующие одновременно как высокой точности, так и больших перемещений.
2. Определенные в результате исследования улучшенные характеристики упругого шарнира типа «Бабочка» показали целесообразность его применения в прецизионных манипуляционных устройствах. В результате экспериментального и конечно-элементного моделирования различных его модификаций разработан новый, улучшенный вариант шарнира.
3. Исследование возможностей замены традиционных вращательных пар упругими шарнирами при структурном синтезе гибридных манипуляционных систем показало, что переход к упругим шарнирам в случае макроманипуляторов существенно ограничивает их рабочее пространство и грузоподъемность.
4. Новая конструкция разработанного прецизионного параллельного микроманипулятора с упругими шарнирами и пьезоэлектрическими приводами может быть использована как в автономной, так и в гибридной системе манипулирования.
5. В результате оптимизации конструкций предложенных упругих шарниров, значительно улучшены их функциональные характеристики, в частности, радиус круглого сечения и толщина шейки, рабочий объем микроступени, который увеличился почти на 20%.
6. С использованием результатов диссертационных исследований разработан и изготовлен макет гибридной манипуляционной системы,

причем для макроступени изготовлен рабочий прототип, а для микроступени - прототип-макет с использованием 3D-принтера.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных статьях:**

**1. Galoyan H.A.** Experimental and Finite Element Analysis of the 3D Printed Flexure Hinges // Proceedings of Engineering Academy of Armenia. - 2019.- Vol. 16, №2.- P. 213-217.

**2. Galoyan H.A.** Finite Element Analysis and Comparison of the Mechanical Properties of the Flexure Hinges // NPUA Proceedings: Mechanics, Machine Science.- 2019.- №2.- P. 28-32.

**3. Galoyan H.A.** Kinematic and Dynamic Analysis of Parallel Delta Micromanipulator // Вестник Российско-Армянского Университета. Физико-Математические и Естественные Науки.– Ереван, 2020.- №1.- С. 76-85.

**4. Galoyan H.A.** Design Modification, Experimental and Finite Element Analysis of “Butterfly” Flexure Pivot // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia: Mechanics, Machine Science, Machine Building. - Yerevan, 2020.- №1.- P. 48-54.

**5. Галоян Г.А., Закарян Н.Б., Арутюнян М.Г., Саргсян Ю.Л.** Проектирование прецизионных микророботов гибридной конструкции // Сб. трудов XXIX Межд. научно-техн. конф. “Машиностр. и техносфера XXI века”.– Донецк-Севастополь, 2022.– Том 1.- С.65-68.

**6. Galoyan H.A.** Design and Analysis of a Novel Tripteron-Inspired Micromanipulator With Flexure Hinges // Вестник Российско-Армянского Университета. Физико-Математические и Естественные Науки.– Ереван, 2023. №1.– P. 54-64.

**Получены авторские свидетельства РА на изобретения:**

7. ՀՀ Գյուտի արտոնագիր, AM20230042Y. Միկրոմանիպուլյատոր / Հրայր Գալոյան.- Երևան, 28.04.2023.

## Գալոյան Հրայր Ալբերտի

### ՄԱԿՐՈ ԵՎ ՄԻԿՐՈԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐՈՎ ՀԻԲՐԴԱՅԻՆ ՄԱՆԴՊՈՒԼՅԱՑԻՈՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ՄԻՆԹԶԸ, ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ ՕՊՏԻՄԱԼ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ

.Ատենախոսական աշխատանքի նպատակն է մակրո և միկրոաստիճաններով հիբրիդային մանիպուլյացիոն համակարգերի ու դրանց բաղադրամասերի կառուցվածքային սինթեզը, մոդելավորումը և օպտիմալ նախագծումը, ինչպես նաև գերճշգրիտ միկրոմանիպուլյատորների մոդելավորման և օպտիմալ նախագծման մեթոդների զարգացումը հետազոտման օբյեկտների առանձնահատկություններին համապատասխան:

Աշխատանքը վերաբերում է այեգոլեկտրական շարժաբերներով, քայլային շարժիչներով և առաձգական հողակապերով մանիպուլյացիոն համակարգերի մոդելավորմանը, դրանց բաղադրիչների հետազոտությանը և բարելավմանը, նոր՝ մոդիֆիկացված կառուցվածքների ստացմանը:

*Առաջին գլխում* կատարվել է գիտատեխնիկական գրականության վերլուծություն: Ուսումնասիրվել են կառուցվածքային և կառավարման տարբեր մեթոդներ՝ ինչպես մակրո, այնպես էլ միկրո մասշտաբներով ճշգրիտ և արդյունավետ մանիպուլյացիոն խնդիրների լուծման համար:

Գրականության վերլուծությունը ցույց տվեց, որ հիբրիդային մակրո և միկրո աստիճաններով հիբրիդային մանիպուլյատորները մեծ պահանջարկ և դեր ունեն ճշգրիտ և արդյունավետ մանիպուլյացիոն խնդիրների լուծման համար: Ընդգծվեց հիբրիդային մանիպուլյացիոն համակարգերին ներկայացվող ֆունկցիոնալ և կառուցվածքային պահանջների հետազոտության անհրաժեշտությունը: Պարզ դարձավ, որ հիբրիդային տեխնոլոգիան ունի աճող ներուժ այնպիսի ոլորտներում, ինչպիսիք են միկրոէլեկտրոնիկայի, միկրոկենսաբանության, միկրովիրաբուժության և այլ առաջատար ոլորտները:

Մակրո և միկրո մանիպուլյատորների հնարավորությունների ինտեգրումը թույլ է տալիս կատարել այնպիսի առաջադրանքներ, որոնք պահանջում են ինչպես բարձր ճշտություն, այնպես էլ մեծ տեղափոխություններ կատարելու կարողություններ:

Գրականության վերլուծությունը ցույց տվեց, որ բարձր ճշտությամբ և արագությամբ տեղափոխություններ կատարելու համար, որպես միկրոմանիպուլյատորների շարժաբեքներ, նպատակահարմար է կիրառել այլեզոհելեկտրական ակտուատորներ, քանի որ դրանք ճշգրիտ հետևում են կառավարող հոսանքի լարման փոփոխությանը, իրենց չափերի համեմատ զարգացնում են մեծ ուժեր և գրեթե զերծ են իներցիոնությունից:

Այսպիսով, գրականության վերլուծությունից հետևում է, որ արդյունավետ համակարգերի ստեղծման համար անհրաժեշտ է զարգացնել միկրո-միկրո հիբրիդային մանիպուլյատորների կառուցվածքային սինթեզի, մոդելավորման, օպտիմալ նախագծման նոր մեթոդներ, որոնք հնարավորություն կտան ապահովել նախանշված պահանջների իրականացումը՝ բարձր ճշտությամբ մեծ տեղափոխություններ կատարելու, արագագործության և էներգաձախսատարության անհրաժեշտ բնութագրերի պահպանմամբ: Ինչպես նաև հիմնավորվում է ձևակերպված խնդիրների տեսական և գործնական կարևորությունը:

***Երկրորդ գլխում*** իրականացված գերճշգրիտ մեխանիզմներում օգտագործման համար նախատեսված «Թիթեռ» առաձգական հողակապի հետազոտության արդյունքում որոշված բնութագրերը ցույց տվեցին, որ դրա կիրառումը լիովին արդարացված է: «Թիթեռ» առաձգական հողակապի տարբեր մոդիֆիկացիաների համար կատարված փորձարարական և վերջավոր տարրերի մեթոդով մոդելավորման արդյունքում մշակվել է նոր՝ լավարկված տարբերակ, որի բնութագրերն առավել մրցունակ են: Մոդիֆիկացված

մոդելների կոշտության փորձարարական ճանապարհով որոշման նպատակով օգտագործված հալեցմամբ վերադրման մոդելավորմամբ (ՀՎՄ) 3D տպման մեթոդը ցույց է տվել իր արդիականությունը, իսկ կոշտության համար տարբեր ազդեցիկ գործոններ որոշվել են վերջավոր տարրերի մեթոդով:

Երկու ազատության աստիճան ունեցող, տարբեր երկրաչափություններով առաձգական հողակապերի մեխանիկական հատկությունների վերջավոր տարրերի միջոցով վերլուծության արդյունքում որոշվել են դրանց կարևոր բնութագրերը և կատարվել համեմատական վերլուծություն: Հողակապերը միմյանց հետ համեմատելի դարձնելու նպատակով կատարվել են նաև մոդիֆիկացման մշակումներ:

Պարզ կառուցվածքով և տարբեր չափերով ուղղանկյունաձև ակոսների առկայությամբ, միաշարժուն առաձգական հողակապերի հետազոտությունը ցույց է տվել ակոսի չափերից կախված դրանց կոշտությունների և թեքման անկյունների արժեքները: Փորձարարական մեթոդով առաձգական հողակապերի պատրաստումը և հետազոտությունը զուգորդվել է դրանց վերջավոր տարրերի մեթոդով վերլուծության հետ, արդյունքում ապացուցելով փորձարարական ճանապարհով ստացված տվյալների հավաստիությունը:

Միկրո մասշտաբի օբյեկտների մանիպուլյացիան իրականացնելու նպատակով մշակվել է պլեգոէլեկտրական շարժաբերով ճշգրիտ միկրոբոնիչ, որի շուրթերի հեռավորության կախումը շարժաբերի տեղափոխությունից որոշվել է վերջավոր տարրերի մեթոդով:

***Երրորդ գլխում*** ուսումնասիրության առարկա մանիպուլյացիոն համակարգերի համար սահմանվել են կիրառություններն ու դրանցից բխող արդյունավետության գնահատման, երկրաչափական, կինեմատիկական և դինամիկական չափանիշները: Մակրո և միկրո աստիճանների համար կառուցվածքային սինթեզի գործընթացի արդյունքում որոշվել են ազատության աստիճանների թիվը, օղակների և զույգերի տարատեսակներն ու



կինեմատիկական շղթայում միացման ձևը՝ ելնելով սինթեզի մուտքային պարամետրերից, չափանիշներից և սահմանափակումներից:

Կատարվել է հիբրիդային մանիպուլյացիոն համակարգի (ՀՄՀ) սինթեզի գործընթացը, որոշվել են ազատության աստիճանների թիվը, օղակների և զույգերի տարատեսակներն ու կինեմատիկական շղթայում միացման ձևը, սինթեզի մուտքի պարամետրերը, չափանիշները և սահմանափակումները □

Հիբրիդային մանիպուլյացիոն համակարգերի կառուցվածքային սինթեզի համար առաձգական հողակապերի միջոցով ավանդական պտտական զույգերի փոխարինման հնարավորության հետազոտությունները ցույց են տվել, որ մակրոմանիպուլյատորների դեպքում առաձգական հողակապերի օգտագործումը էականորեն սահմանափակում է դրանց աշխատանքային տարածությունը և կրողունակությունը՝ ընդգծելով փոխարինման անարդյունավետությունը:

Նախագծվել և մշակվել է Տրիպտերոն ընտանիքին պատկանող առաձգական հողակապերով և այլեզուէլեկտրական շարժաբերներով եռաշարժուն գերճշգրիտ զուգահեռ միկրոմանիպուլյատորի նոր կառուցվածք, որի նորույթը հաստատված է ՀՀ գյուտի արտոնագրով և կարող է կիրառվել ինչպես առանձին, այնպես էլ հիբրիդային համակարգում մակրոմանիպուլյատորի հետ միասին:

Հիբրիդային մանիպուլյացիոն համակարգի առաջարկվող կառուցվածքի ստացման նպատակով իրականացվել է այլեզուէլեկտրական շարժաբերով միկրոբռնիչով համալրված մոդիֆիկացված Տրիպտերոն տիպի միկրոմանիպուլյատորի և Դելտա տիպի մակրոմանիպուլյատորի միավորումը:

**Չորրորդ գլխում** ներկայացված են միկրո աստիճան հասնիդացող Տրիպտերոն տեսակի միկրոմանիպուլյատորի կինեմատիկական և դինամիկական վերլուծությունները, դինամիկական մոդելավորումը, մասնավորապես՝ դիրքի, արագությունների և արագացումների հավասարումները: Կինեմատիկական հավասարումների և փոխակերպման

մատրիցների օգտագործումը հնարավոր է դարձնում ճշգրիտ բնութագրել մանիպուլյատորի էլքի հարթակի դիրքերը: Կինեմատիկայի ուղիղ և հակադարձ խնդիրների միջոցով սահմանվում է հողակապերի և էլքի օղակի դիրքերի միջև կապը՝ հնարավորություն տալով արդյունավետորեն լուծել կառավարման խնդիրները:

Դիտարկվող մանիպուլյատորների աշխատանքային տարածության և կրողունակության հաշվարկման նպատակով վերջավոր տարրերի մեթոդով իրականացված համակարգչային սիմուլյացիայի միջոցով ստացվել են մանիպուլյատորների բնութագրերը: Մակրո աստիճանի համար աշխատանքային տարածությունը ստացվել է 230 մմ տրամագծով և 261 մմ բարձրությամբ գլան, որի հիմքի մակերեսը  $41,548 \text{ մմ}^2$  է, իսկ աշխատանքային ծավալը՝  $10844,028 \text{ մմ}^3$  կամ  $10,844 \text{ սմ}^3$ : Միկրո աստիճանի համար աշխատանքային տարածությունը կազմել է  $1.25 \times 0.78 \times 1.48$  մմ չափերով ուղղանկյուն պրիզմա, որի ծավալը կազմում է  $1.443 \text{ մմ}^3$ :

***Հինգերորդ գլխում*** իրականացված օպտիմալ նախագծման արդյունքում լավարկվել են առաձգական հողակապերի բնութագրերը, շրջանաձև հատույթի շառավիղը և վզիկի հաստությունը, իսկ միկրո աստիճանի աշխատանքային ծավալը մեծացել է գրեթե 20%-ով:

Մշակվել է մակրո և միկրո աստիճաններով հիբրիդային մանիպուլյացիոն համակարգի նախատիպ-մակետը: Մակրո աստիճանի դեպքում պատրաստվել է աշխատունակ նախատիպ, իսկ միկրո աստիճանի դեպքում, լաբորատոր պայմաններում այեզոլեկտրական շարժաբերների և պատրաստման/կառավարման համապատասխան տեխնոլոգիաների բացակայության պատճառով 3D-տպիչի միջոցով պատրաստվել է նախատիպ-մակետը:

**MODELING, STRUCTURAL SYNTHESIS AND OPTIMAL DESIGN OF  
HYBRID MANIPULATION SYSTEMS WITH MACRO AND MICRO LEVELS**

The aim of the thesis is the structural synthesis, modeling and optimal design of macro- and micro-level hybrid manipulation systems and their components, as well as the development of high-precision micromanipulator modeling and optimal design methods in accordance with the characteristics of the research objects.

The work refers to the modeling of manipulation systems with piezoelectric actuators, stepper motors and flexure hinges, research and improvement of their components, obtaining new modified structures.

*In the first chapter*, an analysis of scientific and technical literature was performed. Various structural and control methods have been studied to solve the manipulation problems accurately and efficiently at both macro and micro levels.

The analysis of the literature showed that hybrid manipulators with hybrid macro and micro levels are in great demand and have a role in solving precise and effective manipulation problems. The necessity of researching functional and structural requirements for hybrid manipulation systems was emphasized. It became clear that hybrid technology has growing potential in areas such as microelectronics, microbiology, microsurgery and other leading areas. The integration of macro and micro manipulator capabilities allows for tasks that require both high precision and large displacement capabilities.

The analysis of the literature showed that in order to perform movements with high accuracy and speed, it is advisable to use piezoelectric actuators as micromanipulator actuators, because they precisely follow the change of the control current voltage, develop large forces compared to their size, and are almost free of inertia.

Thus, it follows from the analysis of the literature that in order to create effective systems, it is necessary to develop new methods of structural synthesis, modeling, optimal design of micro-micro hybrid manipulators, which will enable to ensure the implementation of the specified requirements, to perform large movements with high precision, while maintaining the necessary characteristics of speed and energy

consumption. Also, the theoretical and practical importance of formulated problems is justified.

*In the second chapter*, the characteristics determined as a result of the research of the "Butterfly" flexure pivot intended for use in high-precision mechanisms showed that its utilization is fully justified. As a result of experimental and finite element modeling for various modifications of the "Butterfly" flexure pivot, a new, improved version has been developed, the characteristics of which are more competitive. The 3D printing method with fused deposition modeling (FDM) used to experimentally determine the stiffness of the modified models has shown its relevance, and various influencing factors for the stiffness have been determined using the finite element method.

As a result of finite element analysis of the mechanical properties of flexure pivots with two degrees of freedom, with different geometries, their important characteristics were determined and a comparative analysis was performed. In order to make the joints comparable with each other, modifications were also made.

With a simple structure and the presence of rectangular cavities of different sizes, the research of single-movement flexure pivots has shown the values of their stiffnesses and bending angles depending on the groove sizes. The preparation and research of flexure pivots by the experimental method was combined with their analysis by the finite element method, as a result, the reliability of the data obtained by the experimental method was proved.

In order to carry out the manipulation of micro-scale objects, a precise microgripper with a piezoelectric actuator was developed, the dependence of the jaw distance on the displacement of the actuator was determined by the finite element method.

*In the third chapter*, the applications and the resulting efficiency evaluation, geometric, kinematic and dynamic criteria are defined for the manipulative systems under study. As a result of the process of structural synthesis for macro and micro levels, the number of degrees of freedom, the types of links and pairs and the form of connection in the kinematic chain were determined based on the input parameters, criteria and constraints of the synthesis.

The synthesis process of the hybrid manipulation system (HMS) was carried out, the number of degrees of freedom, the types of links and pairs and the form of connection in

the kinematic chain, the input parameters, criteria and limitations of the synthesis were determined.

For the structural synthesis of hybrid manipulator systems, research into the possibility of replacing traditional rotary pairs with flexure pivots has shown that the use of flexure pivots in the case of macromanipulators significantly limits their working space and carrying capacity, emphasizing the inefficiency of replacement.

A new structure of a three-move high-precision parallel micromanipulator with flexure pivots and piezoelectric actuators belonging to the Tripterion family has been designed and developed.

In order to obtain the proposed structure of the hybrid manipulation system, the unification of the modified Tripterion type micromanipulator equipped with a piezoelectric movable microgripper and the Delta type macromanipulator was carried out.

*In the fourth chapter*, the kinematic and dynamic analyses of the Tripterion type micromanipulator are presented, including the dynamic modeling which encompasses the equations of position, velocities, and accelerations. The use of kinematic equations and transformation matrices makes it possible to accurately characterize the positions of the output platform of the manipulator. Through direct and inverse kinematics problems, the relationship between the positions of the joints and the output platform is defined, enabling the effective solution of control problems.

In order to calculate the workspace and payload capacity of the observed manipulators, the characteristics of the manipulators were obtained by means of the finite element method computer simulation. For the macro level, the workspace was obtained as a cylinder 230 mm in diameter and 261 mm in height, with a base area of 41.548 mm<sup>2</sup> and a working volume of 10844.028 mm<sup>3</sup> or 10.844 cm<sup>3</sup>. For the micro level, the workspace was a rectangular prism with dimensions of 1.25x0.78x1.48 mm, the volume of which is 1.443 mm<sup>3</sup>.

*In the fifth chapter*, as a result of the optimal design conducted, improvements have been achieved in the characteristics of flexure pivots, the radius of the circular part, and the thickness of the neck. Furthermore, the workspace of the micro level has increased nearly 20%.

The prototype-model of the hybrid manipulation system with macro and micro levels was developed. In the case of the macro level, a working prototype was prepared, and in

the case of the micro level, due to the lack of piezoelectric actuators and appropriate manufacturing/control technologies in the laboratory, the prototype-model was made using a 3D-printer.

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes that are difficult to decipher as specific text.