

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ РОБОТОТЕХНИКИ И
ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ» (ЦНИИ РТК)

УДК 615.478:616-7

№ госрегистрации 114102040047

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
по научной работе
ЦНИИ РТК

Н.А. Грязнов
«30» июля 2015 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Исследование принципов построения и создания робототехнических средств
доставки радионуклидных микроисточников в опухолевую область
при операциях брахитерапии

(промежуточный, этап 2)

Шифр «2014-14-576-0057-062»

Соглашение о предоставлении субсидии

от «27» июня 2014 г.

№ 14.575.21.0035

в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по
приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса
России на 2014 - 2020 годы»

Санкт-Петербург 2015

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,
Заместитель директора по
научной работе, к.ф.-м.н.

инженер 2 категории

научный сотрудник,
к.б.н.

старший научный сотрудник

Зам. начальника НИО

младший научный сотрудник

ведущий электроник

младший научный сотрудник

инженер 1 категории

начальник лаборатории

младший научный сотрудник

специалист

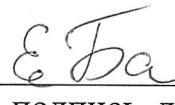
главный научный сотрудник,
д.м.н.

ведущий инженер



подпись, дата

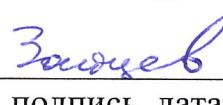
Н.А. Грязнов
(заключение,
общая редакция)



подпись, дата



подпись, дата



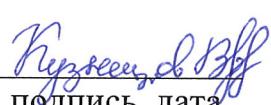
подпись, дата



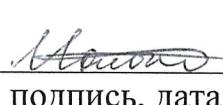
подпись, дата



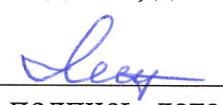
подпись, дата



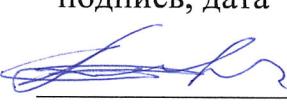
подпись, дата



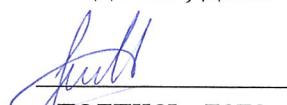
подпись, дата



подпись, дата



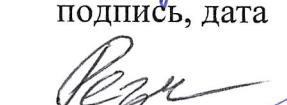
подпись, дата



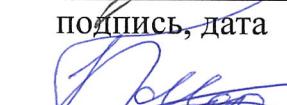
подпись, дата



подпись, дата



подпись, дата



подпись, дата

Н.А. Грязнов
(заключение,
общая редакция)

Е.А. Басов
(раздел 9, 10)

О.М. Богодяж
(раздел 6)

В.В. Зайцев
(раздел 7)

С.А. Захаров
(введение, заключение)

Г.С. Киреева
(раздел 2)

В.А. Кузнецов
(раздел 8)

А.О. Молчанов
(раздел 5)

В.В. Мыглан
(раздел 5)

В.Ю. Некрасов
(раздел 4,5)

С.А. Никитин
(раздел 1,6,7)

С.В. Предо
(раздел 1)

О.Н. Резник
(разделы 9,10)

Н.А. Романов
(разделы 5)

инженер 2 категории


подпись, дата

Р.Д. Рыжиков
(разделы 6)

Главный научный сотрудник,
д.м.н., профессор


подпись, дата

К.Ю. Сенчик
(раздел 7)

научный сотрудник, к.м.н.


подпись, дата

А.Е. Скворцов
(раздел 2)

программист 2 категории


подпись, дата

Д.К. Фадеев
(раздел 5)

ведущий инженер


подпись, дата

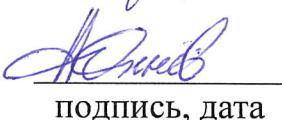
Б.В. Харламов
(раздел 1)

ведущий конструктор


подпись, дата

А.С. Ширин
(раздел 7-9)

инженер 1 категории


подпись, дата

А.Д. Юхнёв
(раздел 6,7)

специалист


подпись, дата

Е.В. Ярошенко
(введение)

нормоконтролер


подпись, дата

О.Ю. Кутлова

РЕФЕРАТ

Отчет 278 с., 110 рисунков, 23 источников, 43 таблицы, 46 формул, 4 приложения.

РОБОТ, РОБОТИЗИРОВАННЫЙ МАНИПУЛЯТОР,
БРАХИТЕРАПИЯ, РАДИОНУКЛИДНЫЕ МИКРОИСТОЧНИКИ, ГИБКИЕ
ИГЛЫ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Объектами проводимого исследования являются принципы построения роботизированных систем для лечения онкологических заболеваний предстательной железы методом брахитерапии.

Целью работы является разработка научно-технического задела в области создания роботизированных средств доставки радионуклидных микроисточников в опухолевую область при операциях брахитерапии для повышения точности введения радионуклидных микроисточников и обеспечения радиационной безопасности медицинского персонала.

В ходе выполнения работы проведён обзор современной научно-технической литературы, затрагивающей проблему разработки математических моделей движения кончика иглы по криволинейной траектории. В ходе анализа представленной информации была разработана собственная математическая модель движения кончика иглы по криволинейной траектории, проведён численный расчёт параметров её движения для различных типов игл.

Была выполнена разработка алгоритмов функционирования макета роботизированной системы по введению радионуклидных микроисточников в тело пациента по линейной и криволинейной траекториям.

На базе полученных алгоритмов разработано программное обеспечение управления макетом роботизированной системы.

Разработаны технические требования к компонентам макета роботизированной системы, к компонентам экспериментального стенда для

проведения исследований и к системе сопряжения макетом роботизированной системы по данным УЗ.

На базе разработанных требований осуществлён анализ и выбор компонентной базы макета, экспериментального стенда и системы сопряжения.

На основе полученных данных выполнены разработка программных решений для компонентов программного обеспечения системы сопряжения и разработка структура программных компонентов и программного обеспечения системы сопряжения.

Степень новизны. Впервые в отечественной медицинской практике для реализации процедуры брахитерапии предложены мехатронные технологии и роботизированные системы. Эффективность процедуры и безопасность для больного обеспечиваются высокой степенью автоматизации и интеллектуализации.

Несмотря на высокую активность в области научно-экспериментальных исследований по роботизации брахитерапии, в мире созданы только лабораторно-экспериментальные образцы и отсутствуют полноценные коммерческие продукты.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 Разработка структуры и определение параметров математического моделирования.....	14
1.1 Обзор научно-технической информации по математическому моделированию криволинейного движения кончика иглы.....	14
1.2 Описание подходов к созданию опытных образцов гибких игл для хирургических операций	27
1.3 Структура и параметры математического моделирования	45
2 Разработка математической модели движения кончика иглы в теле пациента по криволинейной траектории	47
2.1 Основные уравнения	47
2.2 Разработка математической модели прямолинейной иглы	49
2.3 Разработка математической модели круговой иглы.....	50
2.4 Разработка математической модели эллиптической иглы	50
2.5 Решение краевой задачи	51
3 Проведение численного расчёта параметров движения иглы	54
3.1 Результаты расчётов для прямолинейной иглы	54
3.2 Результаты расчётов для круговой иглы.....	56
3.3 Результаты расчётов для эллиптической иглы.....	60
4 Разработка алгоритмов функционирования макета роботизированной системы по введению радионуклидных микроисточников в тело пациента по линейной и криволинейной траекториям	65
4.1 Состав макета роботизированной системы	65
4.2 Разработка алгоритмов функционирования макета роботизированной системы	66
5 Разработка программного обеспечения управления макетом роботизированной системы.....	81
5.1 Выбор программной среды.....	83

5.2	Выбор программного интерфейса математических расчетов.....	83
5.3	Анализ и выбор баз данных.....	84
5.4	Описание программы управления макетом роботизированной системы	84
6	Разработка технических требований к компонентам макета роботизированной системы.....	98
6.1	Характеристики и состав макета роботизированной системы	98
6.2	Разработка технических требований к роботу-манипулятору	100
6.3	Разработка технических требований к устройству перемещения игл	110
6.4	Разработка технических требований к очувствлённому приводу для измерения прилагаемых усилий	112
6.5	Разработка технических требований к пульту управления роботом-манипулятором	113
6.6	Разработка технических требований к системе управления для обеспечения выдачи управляемых команд	114
7	Разработка технических требований к компонентам экспериментального стенда для проведения исследования	119
7.1	Характеристики и состав экспериментального стенда роботизированной системы	119
7.2	Разработка технических требований к системе визуализации	120
7.3	Разработка технических требований к точности измерения положений введённых микроисточников.....	121
7.4	Разработка технических требований к системе управления экспериментальным стендом,	122
7.5	Разработка технических требований к ультразвуковому сканеру	124
7.6	Разработка технических требований к фантуму тканей пациента	125
8	Анализ и выбор компонентной базы макета.....	130
8.1	Анализ и выбор датчика усилия	130

8.2 Анализ и выбор датчика положения в пространстве.....	140
8.3 Анализ и выбор джойстиков для управления макетом роботизированной системы	150
8.4 Анализ технических характеристик двигателей производства Harmonic Drive.....	160
9 Разработка технических требований к системе сопряжения макетом роботизированной системы по данным УЗ и МРТ сканеров.	165
9.1 Разработка технических требований к системе сопряжения	166
10 Анализ и выбор компонентной базы системы сопряжения	168
10.1 Анализ и выбор компонентной базы системы сопряжения.....	170
11 Разработка программных решений для компонентов ПО системы сопряжения.....	188
11.1 Разработка программных решений для робота-манипулятора.....	189
11.2 Разработка программных решений для устройства контроля положения иглы (УКПИ).	189
11.3 Устройство контроля положения УПИ.	190
11.4 Датчики усилий и моментов УПИ	190
12 Разработка структуры программных компонентов и ПО системы сопряжения.....	192
12.1 Разработка организационной структуры программных компонентов ПО системы сопряжения.....	192
12.2 Разработка структуры ПО системы сопряжения.....	196
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	199
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	201
ПРИЛОЖЕНИЕ А	204
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	231
ПРИЛОЖЕНИЕ В	251
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	264

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МРТ – магнитно-резонансная томография

ПК – персональный компьютер

ПО – программное обеспечение

УЗИ – ультразвуковое исследование

УКПИ – устройство контроля положения иглы

УКП УПИ – устройство контроля положения устройства перемещения

игл

УПИ – устройство перемещения игл

ЗКП – зона контроля положения

РМ – робот-манипулятор

ФО – фантом опухоли

РС – реперная система

БУИСС – блок управления интерфейсами системы сопряжения

ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР, выполняемой в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», является Соглашение № 14.575.21.0035 о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 года.

На втором этапе НИР были решены следующие задачи:

- разработана структура и определены параметры математического моделирования;
- разработана математическая модель движения кончика иглы в теле пациента по криволинейной траектории;
- проведён численный расчёт параметров движения иглы;
- разработаны алгоритмы функционирования макета роботизированной системы по введению радионуклидных микроисточников в тело пациента по линейной и криволинейным траекториям;
- разработано программное обеспечение управления макетом роботизированной системы;
- разработаны технические требования к компонентам макета роботизированной системы;
- разработаны технические требования к компонентам экспериментального стенда для проведения исследований;
- проведен анализ и выбор компонентной базы макета;
- разработаны технические требования к системе сопряжения макетом роботизированной системы по данным УЗ;
- осуществлён анализ и выбор компонентной базы системы сопряжения;
- разработаны программные решения для компонентов ПО системы сопряжения;

- разработана структура программный компонентов и ПО системы сопряжения.

В ходе выполнения работ на данном этапе исследования, применительно к разработке математической модели движения иглы по криволинейной траектории, был проведён анализ современной научной литературы затрагивающей подходы к созданию гибких игл, описание их конструктивных особенностей и результаты экспериментальных исследований относительно движения по криволинейной траектории, в совокупности с информацией о математических подходах и способах решения задачи позиционирования кончика иглы для закладки радионуклидных микроисточников можно с уверенностью заключить, что исследование вопроса разработки математической модели движения иглы по криволинейным траекториям в тканях пациента, её параметров и численных расчётов является актуальным и достаточно перспективным направлением в современной хирургии.

На сегодняшний момент, создан научно-технический задел в области отработки движений кончика иглы по криволинейным траекториям с использованием роботов-манипуляторов и специальных устройств перемещения игл с двумя степенями подвижности: поступательной и вращательной. Однако, существующие разработки относятся к экспериментальным или лабораторным образцам, которые, в основном, предназначены для отработки алгоритмов управления. Поэтому, важным направлением, следующим за разработкой математической модели движения иглы, является алгоритмизации работы системы управления робототехническими средствами доставки радионуклидных микроисточников, учитывая весь спектр факторов, влияющих на проведение операции брахитерапии. При этом система управления рассматривается как аппаратно-программный комплекс, включающий в себя, систему сопряжения исполнительного механизма, измерительной системы и системы

визуализации на базе УЗ сканера, систему дозиметрического планирования, систему управления всем комплексом.

Одним из ключевых параметров при проведении процедуры брахитерапии, определяющих её эффективность, является точность позиционирования микроисточников. Параметр является ключевым как при разработке математической модели, так и при разработке алгоритмов управления роботизированной системой. Однако существенно зависит от разрешающей способности системы визуализации на базе УЗ сканера.

Сегодня, операции брахитерапии выполняются вручную с использованием средств визуализации на базе УЗ сканера или МРТ. Обеспечить требуемую точность позиционирования микроисточников можно посредством автоматизации процедуры на основе робототехнического комплекса, который включает в себя систему исполнительных механизмов, систему визуализации, измерительную систему, систему сопряжения и управляющий пользовательский компьютер. Обеспечив высокое быстродействие системы сопряжения, высокую разрешающую способность УЗ сканера, высокую точность измерений, надёжные и эффективные алгоритмы работы всех частей системы, можно обеспечить и требуемую точность позиционирования.

Ещё одним важным вопросом при отработке прямолинейных и криволинейных траекторий является минимизация травматизма тканей пациента. Достичь этого при проведении операции вручную практически не представляется возможным, из-за большого количества негативно влияющих факторов, таких как: неравномерное распределение усилий хирургом при прокалывании ткани, в результате которых кончик иглы проскакивает точку с заранее рассчитанными координатами, ручное позиционирование иглы по шаблону также увеличивает погрешность попадания в заданную точку, отек тканей как последствие прокалывания их иглой, и многие другие.

Таким образом, для достижения высоких показателей надёжности, минимальной травматичности, высокой точности и быстродействия системы

необходимо вести разработку роботизированной системы брахитерапии опираясь на современные технологии, высокотехнологичную компонентную базу и актуальные технические решения, а также на опыт таких разработок в области медицинской робототехники.

1 Разработка структуры и определение параметров математического моделирования

Основным объектом исследования в данном разделе является медицинская игла, контактирующая со средой, моделирующей тело пациента.

1.1 Обзор научно-технической информации по математическому моделированию криволинейного движения кончика иглы

Перед непосредственной разработкой математической модели движения кончика иглы по криволинейной траектории был проведён обзор научной литературы, посвящённой данной тематике. В ходе обзора были определены актуальные направления исследований, которые посвящены управлению движением игл и их математическому моделированию. Также были определены и области их применения такие как: биопсия лёгких, термическая абляция, нейрохирургия, лазерная литотрипсия, брахитерапия и др.

Следует обратить внимание и на различие в конструктивном исполнении игл. В ряде работ под управляемой или гибкой иглой понимается тонкий, гибкий металлический стилет, который управляется извне с помощью механической тяги, в других работах рассматриваются иглы с высокой степенью гибкости, благодаря свойствам соответствующего металла. В качестве образца ткани пациента используется желатин, как материал, близкий по своим свойствам к ткани человека.

Так, в 2008 году для операции по биопсии лёгких проводились эксперименты по использованию управляемой иглы, вращение и поступательное перемещение которой осуществлялось с помощью роботизированной системы [1]. Авторами в качестве гибкой иглы рассматривается металлический стилет, траектория движения которого,

формируется с помощью роботизированного привода – Acubot robot system. Система представлена на рисунке 1.1.

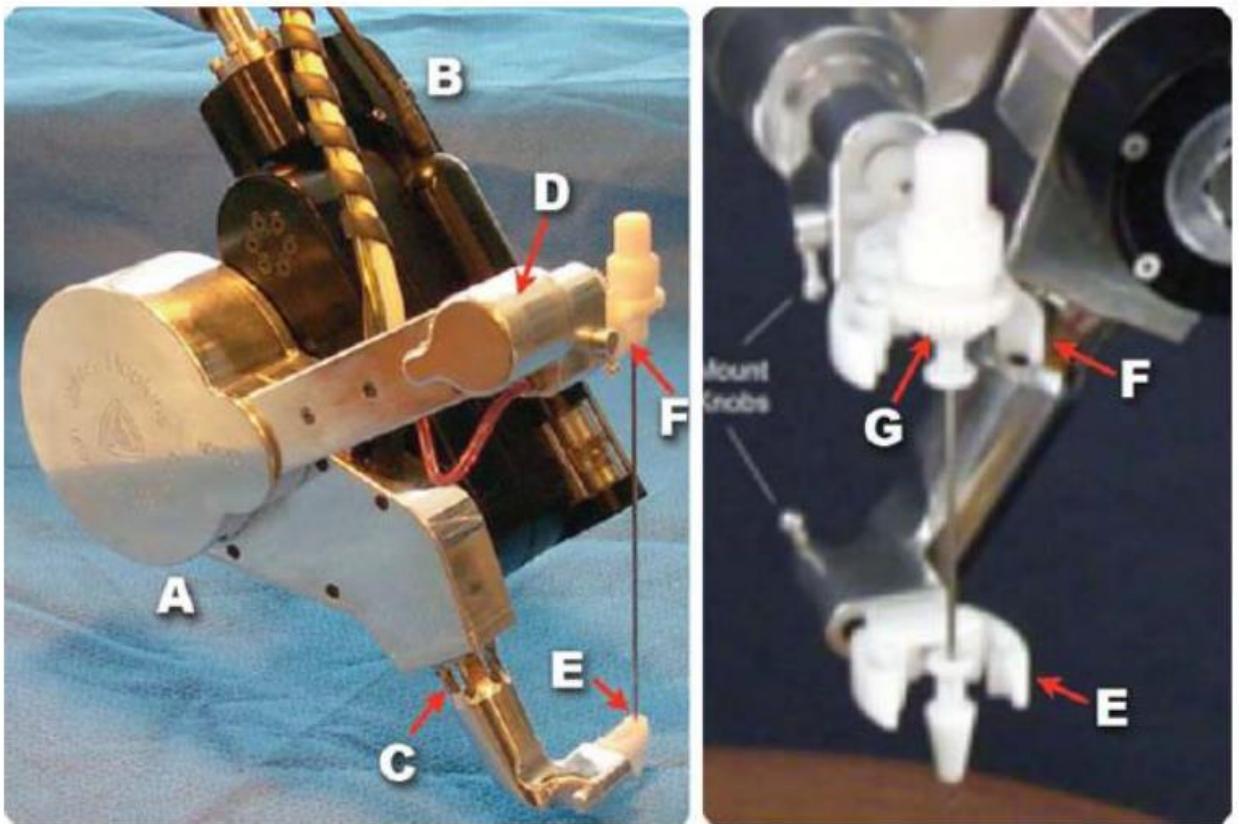


Рисунок 1.1 – Роботизированная система Acubot robot system для биопсии лёгких. А – привод вращения иглы, В – привод продольного перемещения иглы, С,Д – датчики усилия, Е,Ф – зажимы для фиксации, Г – иглодержатель.

Математическое моделирование проводилось с использованием неголономной кинематической модели в среде Matlab. С помощью графического интерфейса моделировалась кривая траектория движения иглы, после чего, производилась соответствующая оценка. Результатом моделирования служит график представленный на рисунке 1.2.

Глубина инъекции во всех трёх случаях составляет 10 см. Пунктирная линия красного цвета соответствует перемещению иглы в фантоме ткани без какого либо вращения. Пунктирная линия синего цвета соответствует перемещению иглы с вращением на 180° . И сплошная линия чёрного цвета соответствует перемещению иглы с двойным вращением, где на угол поворота составляет 120° . Полученные результаты сопоставлялись с

экспериментальными данными. Для минимизации отклонения точек, полученных экспериментальным путём, использовался метод наименьших квадратов.

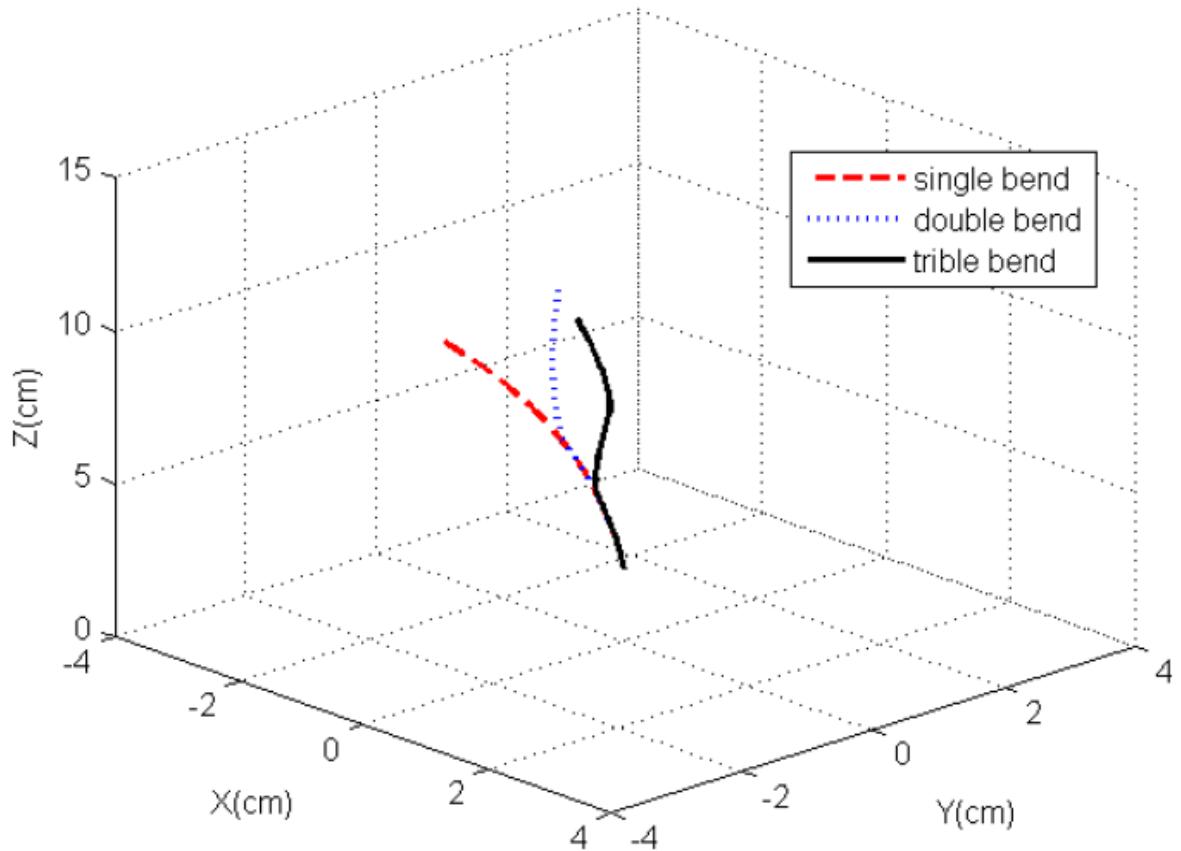


Рисунок 1.2 – Моделирование траектории иглы в зависимости от угла вращения и количества вращений.

Результатом сопоставления послужили два графика представленные на рисунках 1.3 и 1.4 соответственно. Графики иллюстрируют расхождение эксперимента с моделью. И как можно заключить, в случае с двойным поворотом эти расхождения существенны.

Сплошная линия синего цвета соответствует смоделированной траектории с одним и двумя вращениями иглы соответственно. Пунктирная линия и точки красного цвета соответствуют эксперименту как для одного так и для двух вращений иглы.

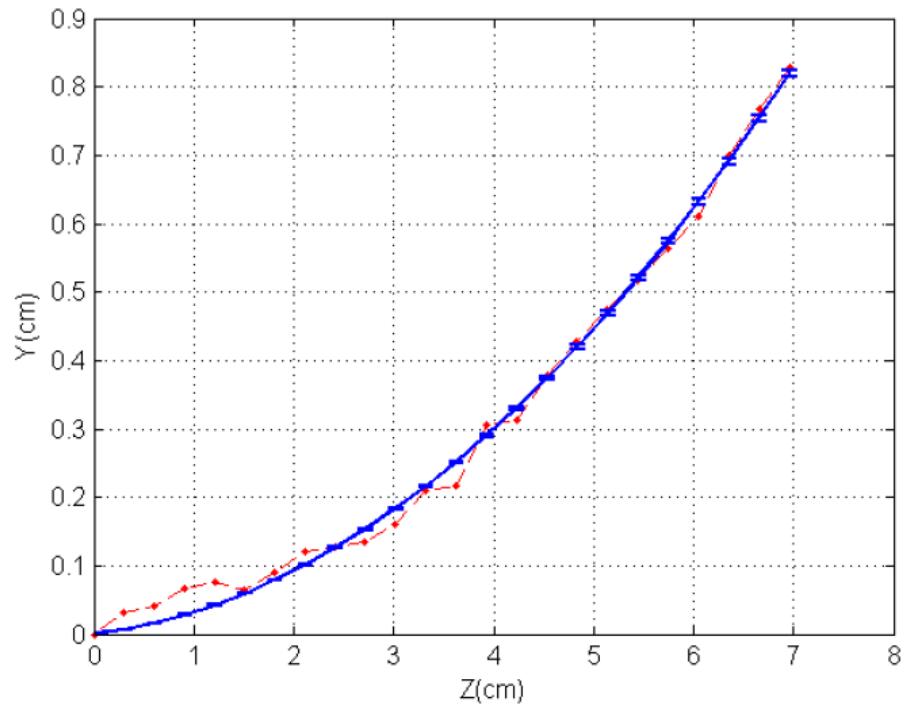


Рисунок 1.3 – Верификация моделирования криволинейной траектории с экспериментом с одним вращением иглы.

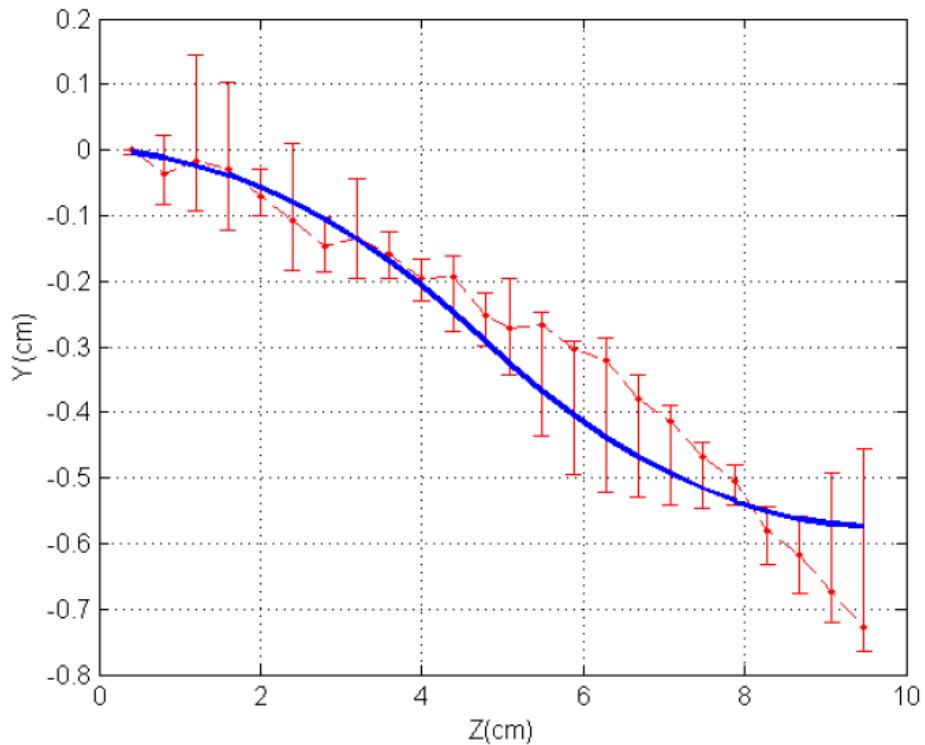


Рисунок 1.4 – Верификация моделирования криволинейной траектории с экспериментом с двумя вращениями иглы.

Как заключают сами авторы, работа находится на первоначальном этапе математического моделирования и не может рассматриваться как

полноценное исследование. Целью работы являлось установление возможности управления иглой для реализации криволинейной траектории в общем, а такие вопросы как точность позиционирования, обход препятствий, математический подход к описанию движения кончика иглы по криволинейной траектории, расчёт параметров математической модели не рассматривались.

В работе [2] математическое моделирование оптимальной криволинейной траектории движения иглы описывается с помощью алгоритмов планирования траектории. Формирование траектории осуществляется с помощью координат, конфигурирующих некую область. В этой области выделяются те её части, которые необходимо обходить, и те части, которые могут являться возможным вариантом траектории. Выделение таких областей предлагается с помощью четырёх методов: метод потенциальных полей, метод дорожных карт, метод декомпозиционного планирования и метод координатных сеток. Графически методы представлены на рисунках 1.5, 1.6, 1.7, 1.8 соответственно.

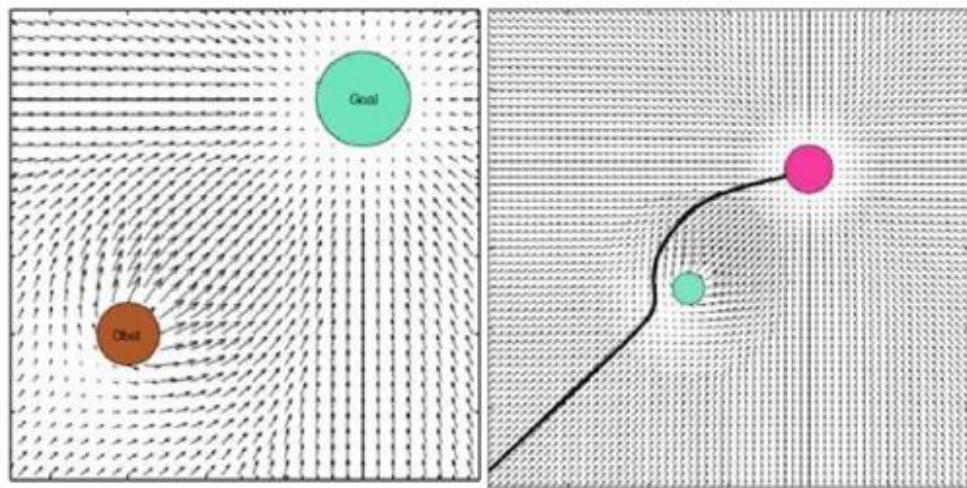


Рисунок 1.5 – Графическое изображение метода потенциальных полей, положительного и отрицательного.

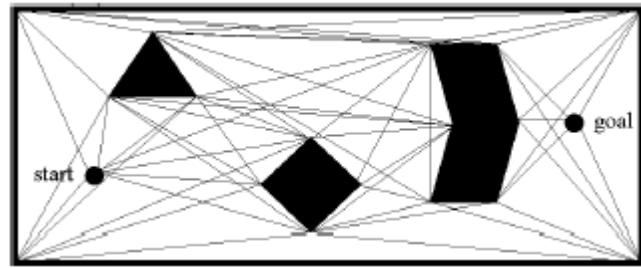


Рисунок 1.6 – Графическое изображение метода дорожных карт.

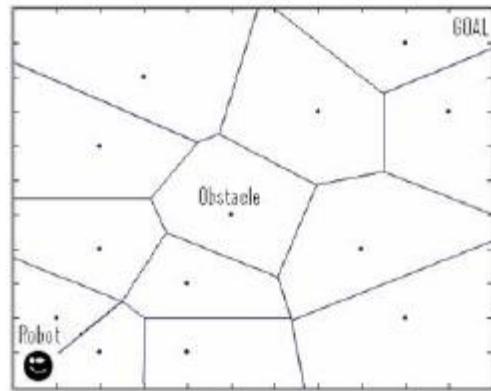


Рисунок 1.7 – Графическое изображение метода декомпозиционного
планирования.

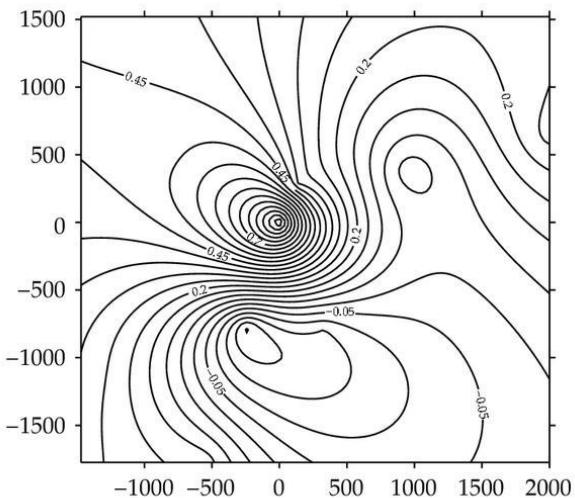


Рисунок 1.8 – Графическое изображение метода координатных сеток.

Авторы полагают, что наиболее эффективным методом для расчёта оптимальной криволинейной траектории для обхода препятствий является метод дорожных карт. Сущность метода в определённой мере отображает его иллюстрация по расчёту наикратчайшей траектории с обходом препятствий в тканях мозга для попадания в заданную точку (рисунок 1.9 [2]).

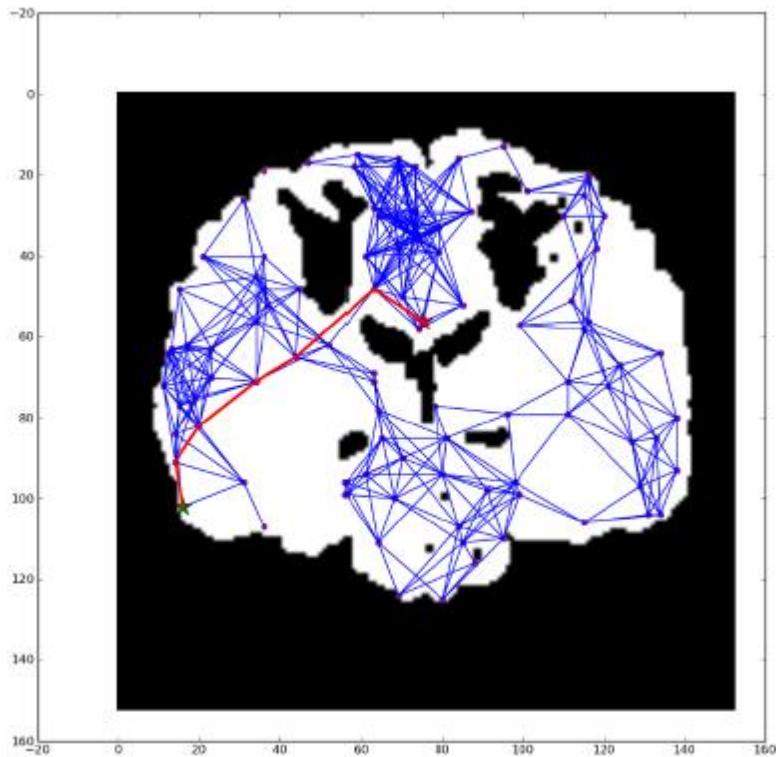


Рисунок 1.9 – Расчёт оптимальной траектории методом дорожных карт.

Математическое моделирование проводилось в среде Matlab. Полного описания математической модели, её параметров и расчётов в работе не представлено. Поэтому проблематично оценить практическую значимость предлагаемых подходов к построению криволинейных траекторий движения кончика иглы.

В работе [3] исследовались два математических подхода отклонения иглы. Первый подход – кинематический, он описывает траекторию движения иглы исходя из привязки к глобальной системе координат и предполагает, что благодаря конструктивной особенности кончика иглы ассиметричной конической формы игла будет перемещаться по круговой траектории. Второй подход – механический, он описывает систему взаимодействия сил между иглой и тканью, в которой она находится, поскольку с одной стороны требуются силы для перемещения иглы внутри ткани, с другой стороны на тело иглы воздействуют силы трения, силы распределённой нагрузки, а в силу не симметричности кончика иглы на него также воздействует сила, оказывающая давления со стороны ткани. Графически подходы изображены

на рисунках 1.10 и 1.11 соответственно. Рассмотрим предлагаемые подходы более подробно.

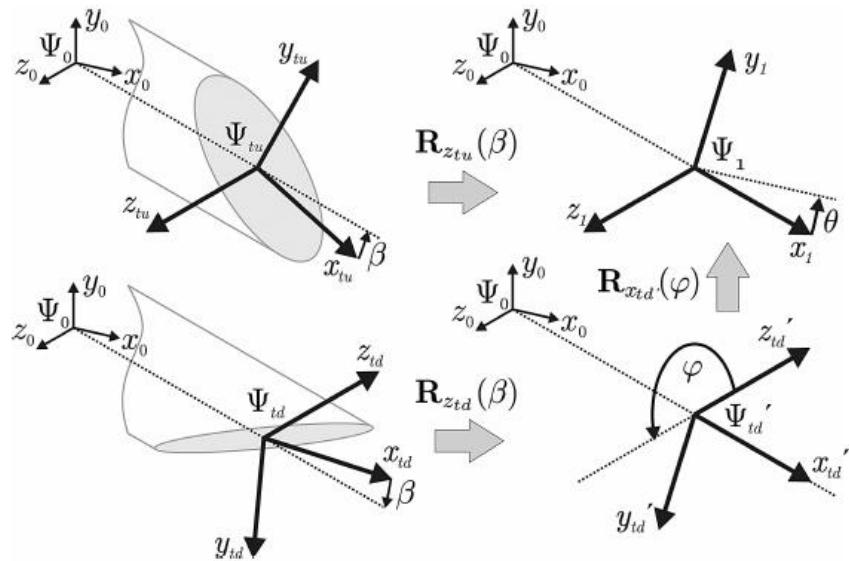


Рисунок 1.10 – Графическая иллюстрация кинематического подхода.

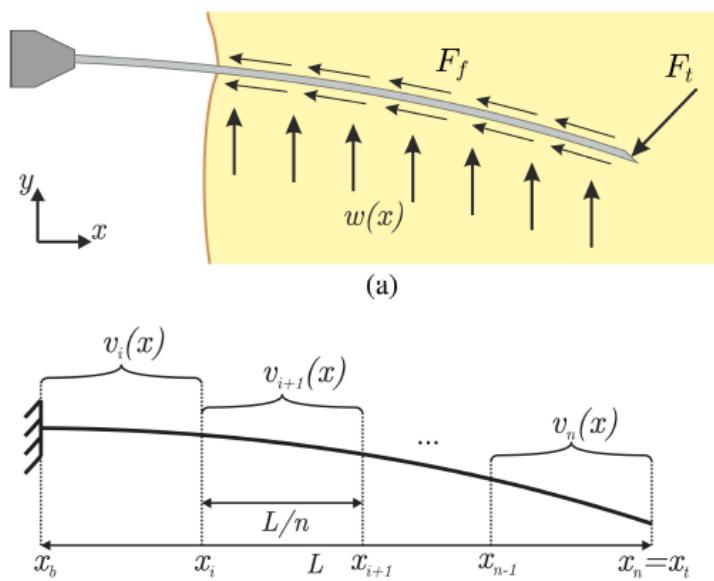


Рисунок 1.11 – Графическая иллюстрация механического подхода.

Перечислим параметры кинематической модели известные нам априори: глобальная система координат Ψ_0 , угол среза β , угол между осями x_1 , система координат центра эллипса асимметричного кончика Ψ_{tu} когда поверхность среза направлена вверх и система координат центра эллипса

ассиметричного кончика Ψ_{td} , когда поверхность среза направлена вниз. На рисунке 1.12 изображён процесс прокалывания и входа в ткань пациента с указанием параметров кинематической модели.

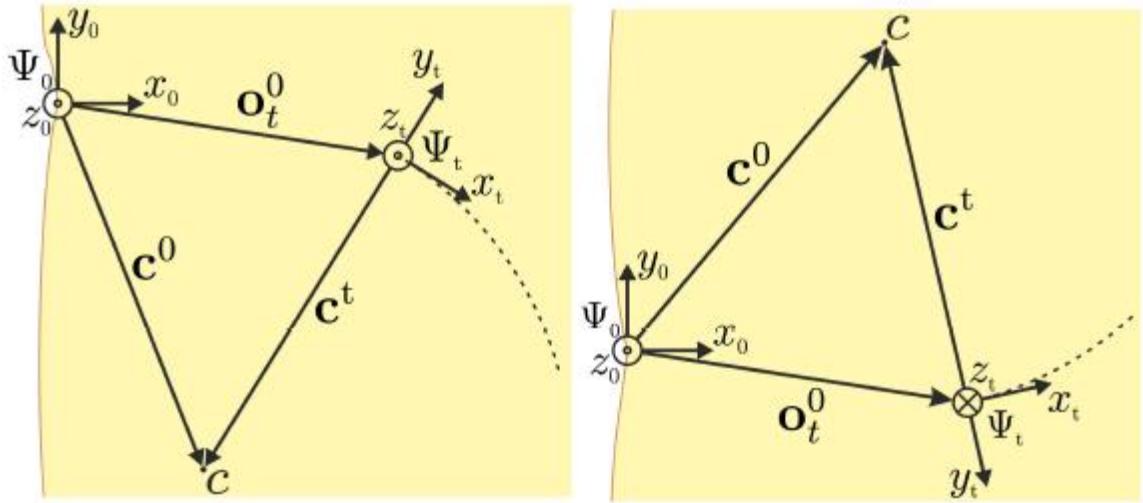


Рисунок 1.11 – Графическая иллюстрация кинематического подхода в момент прокалывания ткани и перемещения внутри неё.

Уравнения, описывающие криволинейную траекторию, представлены в матричном виде. В случае, когда кончик смотрит, вверх матрица поворота определяется по формуле:

$$R_{tu}^1 = R_{z_{tu}}(\beta) \quad (1)$$

когда кончик смотрит вниз, матрица поворота определяется по формуле:

$$R_{td}^1 = R_{z_{td}}(\beta)R_{x_{td}'}(\varphi) \quad (2)$$

Зная координаты положения кончика $(x_{tip} \ y_{tip})$, угол отклонения между осью глобальной системы координат x_0 и осью x_1 – θ , можно определить отклонение иглы в каждый момент времени. Однако, данный подход не является всеобъемлющим и не часто встречается при моделировании криволинейных траекторий движения иглы.

Наиболее распространённым подходом, описывающим, движение иглы в тканях пациента является механический подход. Схематично он представлен на рисунке 1.12.

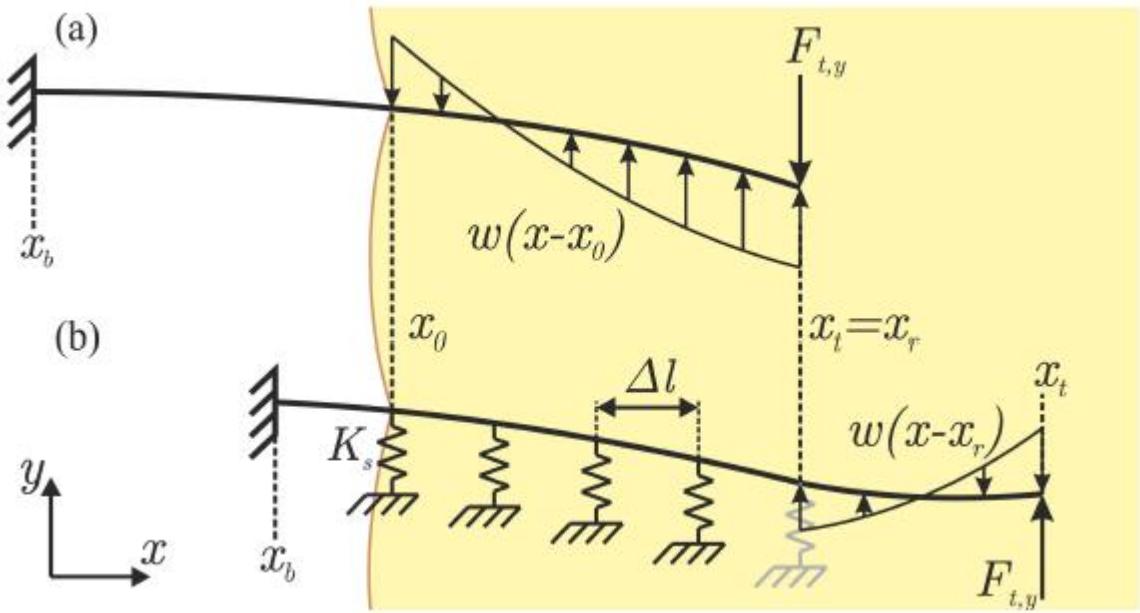


Рисунок 1.12 – Графическая иллюстрация механического подхода в момент прокалывания ткани и перемещения внутри неё.

Игла представляется в качестве консольной балки, имеет поперечную жёсткость и продольную гибкость. Поэтому существенные отклонения иглы происходят только в плоскости x_0y . В момент взаимодействия иглы с тканью отклонение происходит за счёт сочетания, действующей на иглу, распределённой нагрузки $w(x)$ и силы F_t , действующей на асимметричный кончик иглы. В случае многократных вращений игла моделируется в виде серии соединенных между собой пружин. Предполагая, что величина Δl бесконечно мала, всё тело иглы, находящееся во взаимодействии с тканью можно описать через формулу:

$$K_t = K_0(x_r - x_0) \quad (3)$$

Для расчёта отклонения иглы под действием распределённой нагрузки и силы, действующей на асимметричный кончик, используется метод Рэлея-Ритца, как вариационный метод, в котором равновесие системы устанавливается с помощью принципа минимума потенциальная энергии. Общая формула для расчёта выглядит так:

$$\Pi = U - W, \quad (4)$$

где, U – внутренняя энергия системы, W – работа по преодолению внешний сил.

Таким образом для однократного вращения уравнение внутренней энергии примет вид:

$$U_b = \frac{EI}{2} \int_{x_b}^{x_t} \frac{d^2v(x)}{dx^2} dx, \quad (5)$$

где, E – модуль Юнга, I – второй момент инерции иглы.

Для многократных вращений уравнение внутренней энергии примет вид:

$$U_s = \sum_{k=0}^m \frac{1}{2} K_s v(x_k)^2, \quad (6)$$

где, K_s – коэффициент жёсткости пружин, $v(x_k)$ – величина прогиба для каждой пружины.

Работа W , представляется как сумму работ W_d – по преодолению воздействия распределённой нагрузки на тело иглы, W_c – по преодолению силы, действующей на кончик иглы.

$$W_d = \int_{x_0}^{x_t} w(x)v(x)dx \quad (7)$$

$$W_c = F_{t,y} v(x_t), \quad (8)$$

где, $v(x_t)$ – отклонение иглы.

В данной работе [3], авторы представили два подхода к математическому моделированию криволинейных траекторий с описанием уравнений и их решений. Для оценки погрешности предложенных подходов был проведён эксперимент, устанавливающий соответствие между поведением модели и реальным объектом и сопоставление двух подходов между собой (Рисунок 1.13, 1.14 [3]). Также приведены результаты измерений погрешности в таблице 1.

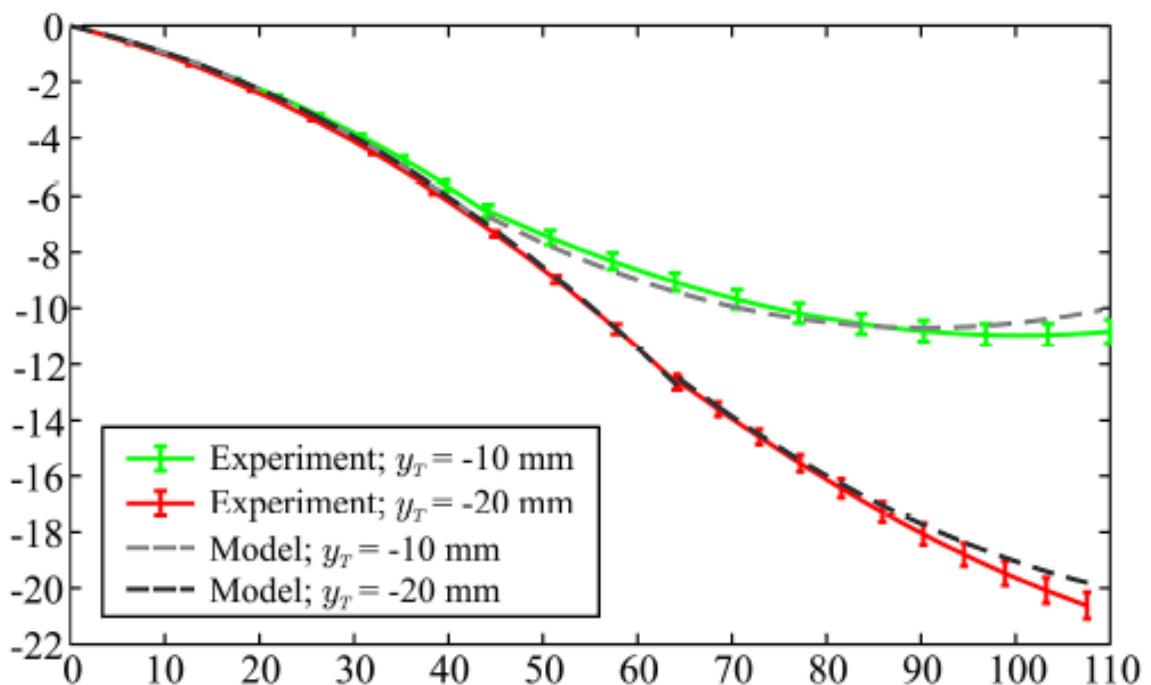


Рисунок 1.13 – График верификации кинематического подхода реального объекта и модели при глубине в 10 и 20 мм..

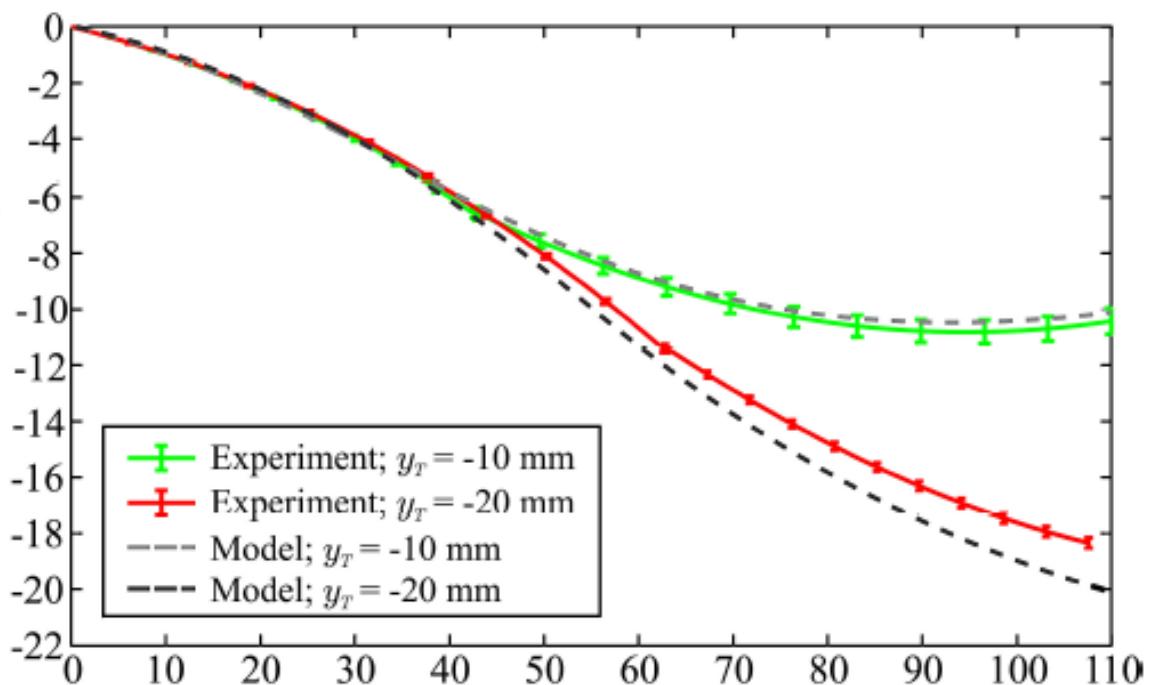


Рисунок 1.14 – График верификации механического подхода реального объекта и модели при глубине в 10 и 20 мм..

Таблица 1 – Результаты измерений погрешности

Подход	Y _T (мм)	X _r (мм)	Y _{tip,exp} (мм)	E(X _T) (мм)	Σ(X _T) (мм)
Кинематический	-10,0	44,2	-10,8	0,8	0,4
	-20,0	64,2	-20,6	0,6	0,5
Механический	-10,0	42,8	-10,4	0,4	0,5
	-20,0	62,8	-18,3	1,7	0,2

Несмотря на подробное описание подходов к математическому моделированию криволинейных траекторий, нерассмотренными остались такие важные вопросы как: обеспечение заданной точности позиционирования, оценка травматичности при перемещении иглы по криволинейной траектории, теоретические исследования и расчёт потери устойчивости управления при зависимости усилия от длины иглы.

В работе [4] к рассмотрению предлагается стохастическая модель, т.к. при многократных инъекциях, игла будет демонстрировать каждый раз отличающиеся друг друга траектории это можно учесть добавление в уравнения:

$$w(t) = w_0(t) + \lambda_1 w_1(t) \quad (9)$$

$$v(t) = v_0(t) + \lambda_2 v_2(t), \quad (10)$$

где, $w_0(t)$ и $v_0(t)$ – идеальное развитие событий, а $w_1(t)$ и $v_2(t)$ – белый шум с константами λ_1 и λ_2 . Однако подробного описания данной модели в работе не представлено.

Таким образом, проведённый обзор научной литературы по математическому моделированию криволинейного движения кончика иглы позволяет сделать вывод о том, что рассмотренные математические подходы и существующие математические модели не в полной мере описывают весь процесс взаимодействия двух объектов – среды и иглы. Остаются без внимания вопросы травматичности ткани при перемещении по криволинейным траекториям, вопросы устойчивости, заданной точности позиционирования, численный расчёт при таких перемещениях. В свою

очередь это подтверждает актуальность разработки математической модели, определение параметров моделирования, а также проведение численного расчёта параметров движения иглы.

1.2 Описание подходов к созданию опытных образцов гибких игл для хирургических операций

При разработке структуры и определении параметров математического моделирования будем опираться на опыт конструирования экспериментальных образцов гибких игл. Это позволит оптимизировать структуру модели и определить её параметры.

В современной научной литературе, посвящённой описанию методик использования гибких игл, отведено достаточное внимание основным направлениям в исследовании этого вопроса.

Первое направление связано с конструктивными особенностями и различными вариантами реализации гибких игл для проведения не только операций по брахитерапии, но и по биопсии, нейрохирургии и др, поскольку условия проведения достаточно схожи. Второе направление связано с математическим моделированием движения гибкой иглы в мягких тканях. И третье направление исследований связано с проведением экспериментов и созданием опытных образцов технических устройств различной сложности для решения задач брахитерапии и не только.

При детальном рассмотрении операции брахитерапии с низкодозным облучением, одним из главных этапов является доставка и закладка микроисточников в область опухоли. Особое внимание в этом процессе уделяется конструктивным особенностям игл. На сегодняшний день в медицинской практике наиболее часто применяется прямолинейный подход закладки микроисточников. Нас интересует его перспективная альтернатива – криволинейный подход, основанный на использовании гибких игл. Поскольку такой подход даёт возможность:

- сократить количество используемых игл, что в свою очередь снижает количество повреждённой ткани пациента;
- позволяет снизить риск облучения жизненно важных органов, костей и мягких тканей, поскольку, за счёт гибкости иглы микроисточники могут закладываться по криволинейной траектории, огибая эти ткани;
- в отличие от прямолинейного подхода, в котором в зависимости от расположения внутренних органов не всегда есть возможность пройти прямым путём, криволинейный подход позволяет это делать;

Так, например Conor J. Walsh в работе [5] для проведения нейрохирургических операций представляет конструкцию, состоящую из телескопического металлического стержня - канюли и гибкого стилета, который находится внутри стержня. Канюля крепится к пластиковому цилиндуру, который в свою очередь через механическую систему сочленён с приводами, осуществляющими поступательно-вращательные движения стилета. Система представлена на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 – Прототип инструмента на базе канюли для реализации криволинейных траекторий для нейрохирургических операций

Цилиндр, в свою очередь, крепиться к роботу-манипулятору с двумя степенями подвижности, как изображено на рисунке 1.16. Проникновение в ткань осуществляется посредством приводов с вращательными степенями свободы. Управление движением по криволинейной траектории

осуществляется за счёт гибкого стилета, с заранее заданными характеристиками. Для стабильного протекания процесса внедрения, канюля также внедряется в ткань на небольшую глубину в диапазоне от 10-20 мм. Это позволяет увеличить глубину проникновения в ткань самого стилета и использовать силы, оказывающие воздействие со стороны ткани, как дополнительный элемент фиксирования канюли во время перемещения стилета.

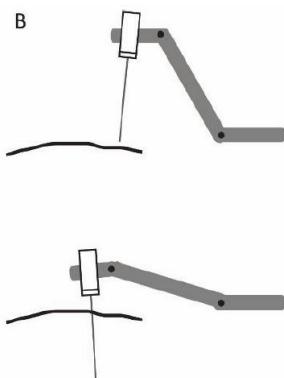


Рисунок 1.16 – Система управления иглой с помощью робот-манипулятора

Был проведён эксперимент, результатом которого стала фиксация отклонения стилета при прохождении сквозь желатин в шести точках по оси X на 40 мм. Результаты представлены на рисунке 1.17

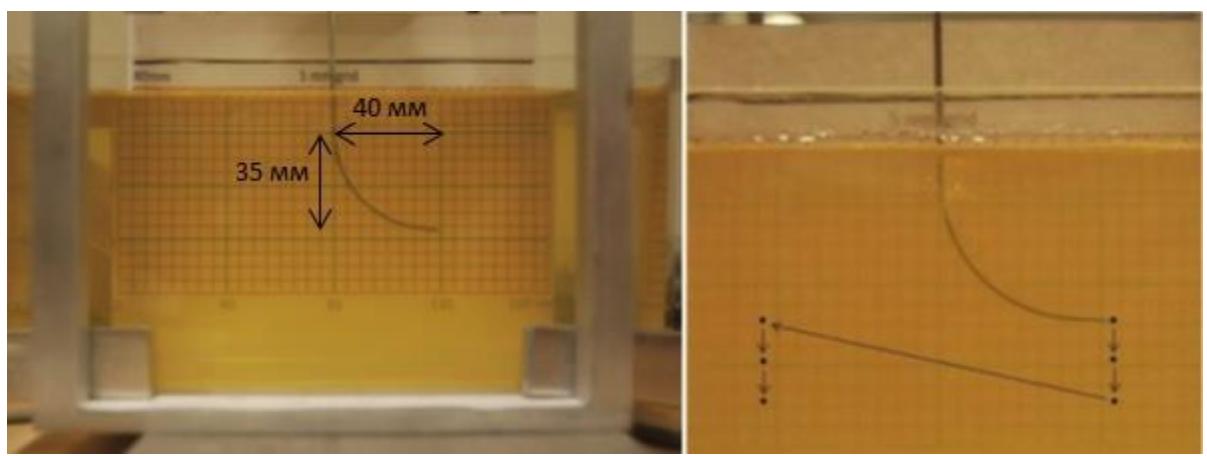


Рисунок 1.17 – Отклонение стилета на 40 мм при глубине в 35 мм

Использовались стилеты двух диаметров: 0,635 мм и 0,838 мм и проводилось сравнение поведения, ранее разработанной, модели с реальным

объектом. Результаты сравнения представлены на рисунке 1.18 в виде графиков и в таблице 2.

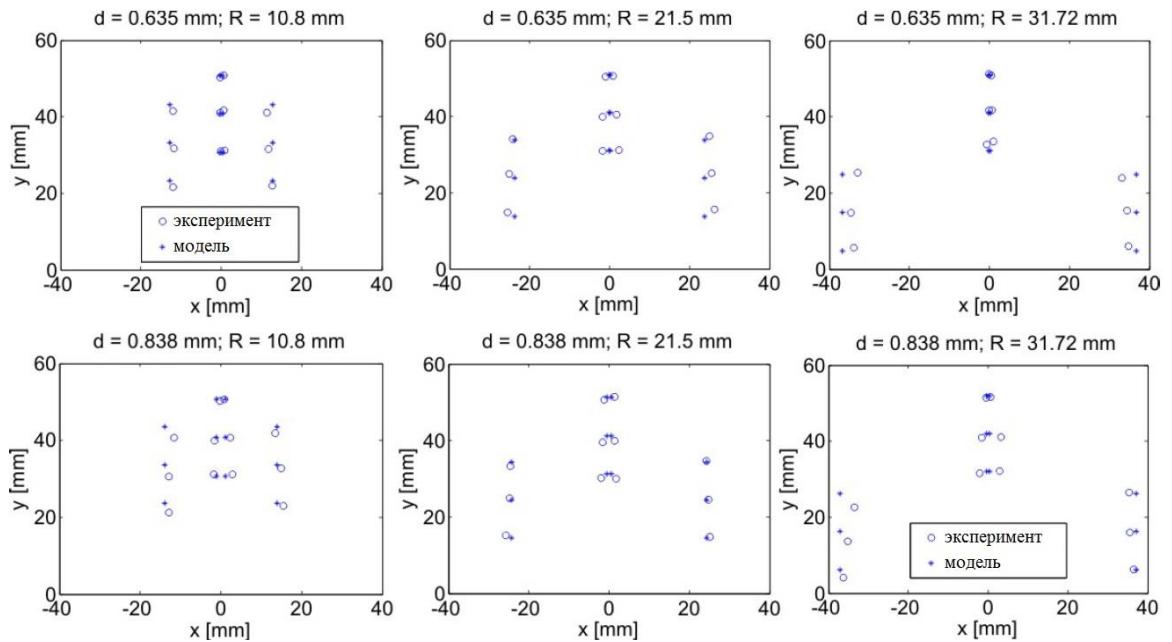


Рисунок 1.18 – Сравнения результатов попадания в заданные точки модели и реального объекта

Как можно видеть из таблицы 2, наибольшая точность получается при диаметре стилета 0,838 мм и радиусе кривизны 21,55 мм и равна $1,27 \pm 0,72$ мм, что вполне удовлетворяет требованиям технического задания, обеспечить точность позиционирования ± 5 мм.

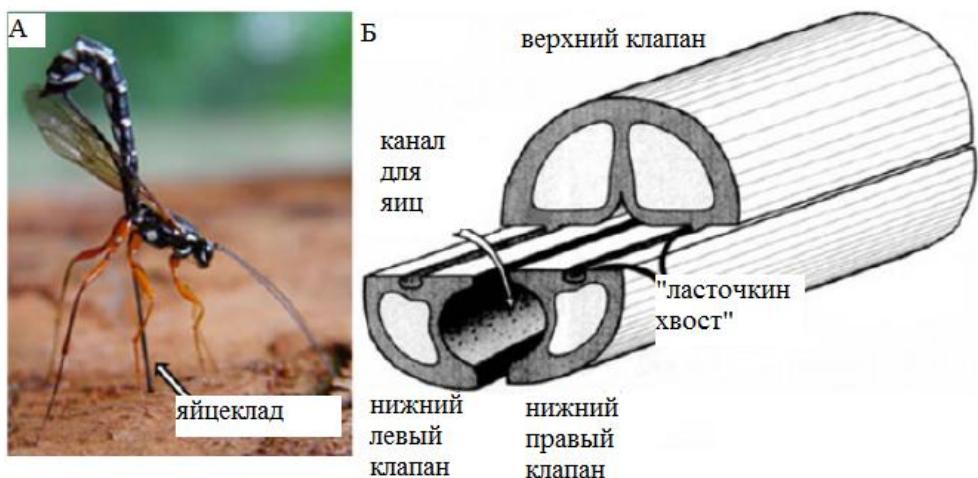
Таблица 2. Точность позиционирования реального объекта по отношению к модели

Диаметр стилета	Радиус кривизны $R1=10.85$ мм	Радиус кривизны $R2=21,55$ мм	Радиус кривизны $R1=31,72$ мм
$D=0.635$ мм	$3,34 \pm 0,77$	$1,61 \pm 0,61$	$2,96 \pm 2,16$
$D=0.838$ мм	$3,26 \pm 1,03$	$1,27 \pm 0,72$	$2,47 \pm 1,41$

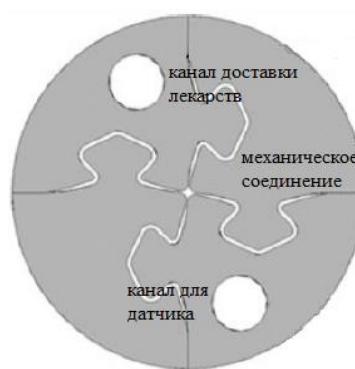
Однако, данная конструкция разрабатывалась для проведения операций нейрохирургии. Здесь не учитывается наличие микроисточников в канале и возможность их доставки и закладки в область опухоли. Поэтому представленные результаты не в полной мере соответствуют нашим задачам,

но учитывая простоту в реализации и конструктивного исполнения, данный принцип построения может быть взят за основу применительно к решению задач точного позиционирования в проведении брахитерапии с низкодозным облучением.

В работе [6] реализован иной принцип управления криволинейным движением иглы. Принцип заключается в конструктивной особенности самой иглы. Он позаимствован у природы, у Большого рогохвоста, жало которого изображено на рисунке 1.19.



Авторы обратили внимание на структуру и тип соединения между каждым сегментом. И на основе этого предложил свой вариант гибкой иглы, предусмотрев в двух из четырёх сегментов канал для подачи лекарственных средств и канал для размещения датчика. Срез иглы представлен на рисунке 1.20.



Принцип криволинейного движения иглы заключается в том, что за счёт перемещения сегментов относительно друг друга по направляющим, которые имеют соединение по типу «ласточкин хвост», и силы, оказывающей воздействие на кончик иглы, изменяется угол отклонения иглы от прямолинейной траектории и радиус кривизны, в результате чего игла перемещается в ткани по криволинейной траектории. Конструктивно изображение иглы представлено на рисунке 1.21.

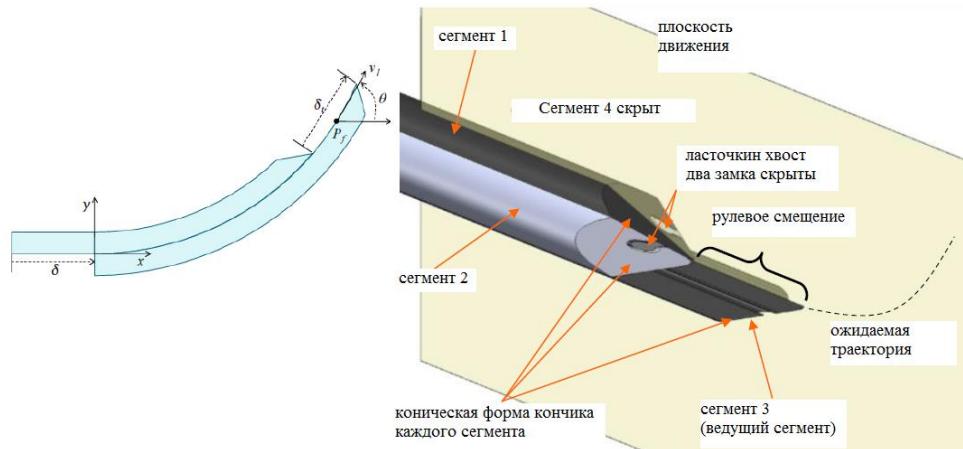


Рисунок 1.21 – Конструкция гибкой иглы из нескольких сегментов

Особенностью конструкции также является то, что не все сегменты являются активными, то есть способными к перемещению. Для реализации криволинейного движения иглы достаточно двух активных сегментов, расположенных параллельно друг другу, как показано на рисунке 1.22.

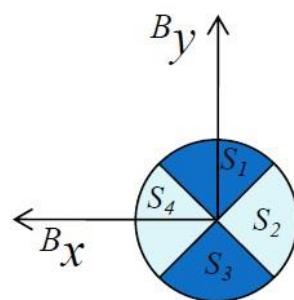


Рисунок 1.22 – Профиль конструкции гибкой иглы из нескольких сегментов, где сегменты S2 и S4 – активные, S1 и S3 – пассивные.

Поскольку в данной системе, помимо криволинейной траектории, заложены функции доставки лекарств и отслеживания положения кончика иглы с помощью датчика, разработчики предусмотрели дополнительную

возможность по размещению необходимых кабелей передачи информации или управляющих сигналов в отверстиях, расположенных в каждом сегменте, как показано на рисунке 1.23.

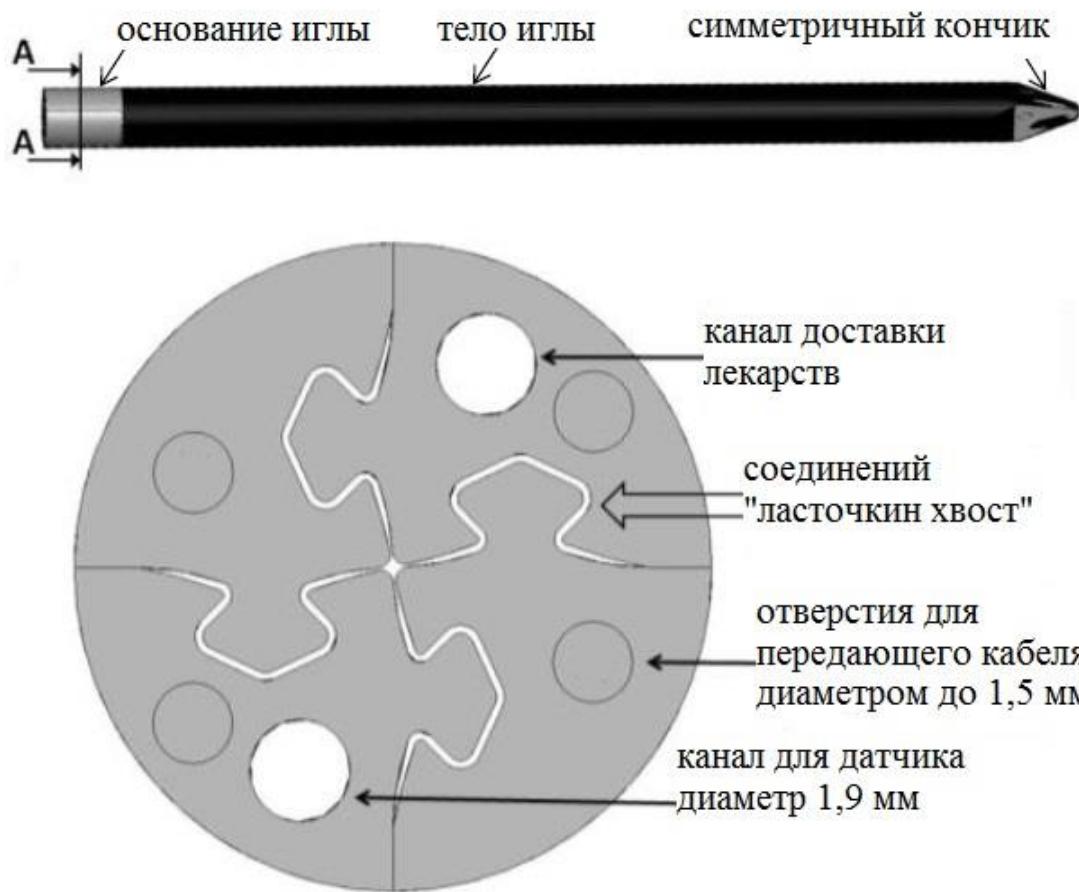


Рисунок 1.23 – Размещение дополнительных каналов для прокладки кабелей управления

Движение сегментов относительно друг друга осуществляется посредством системы приводов, связанной с иглой через силовой кабель управления диаметром 1,5 мм, соединённый с основанием иглы. Сегменты иглы управляются с помощью двигателя постоянного тока, соединённого с винтом – Maxon A-max22, мощностью 6 Вт., с максимальным моментом 6,77 мНм., передаточным отношением 4,4, с шагом 4 мм. Таким образом, 4 привода расположены в отдельном корпусе, что удобно для подключения и проведения всех экспериментов. Макет системы привод-игла представлен на рисунке 1.24.

Для тела иглы за основу был взят резиновый материал с высокой степенью эластичности – TangoBlack FullCure 970 с пределом прочности 2 МПа, твёрдостью по Шору 61 единица и удлинением при разрыве 48% , а для основания и кончика иглы более жёсткий материал из пластика – VeroWhite FullCure 830 с пределом прочности 50 МПа, твёрдостью по Шору 83 единицы и удлинением при разрыве 20 %.

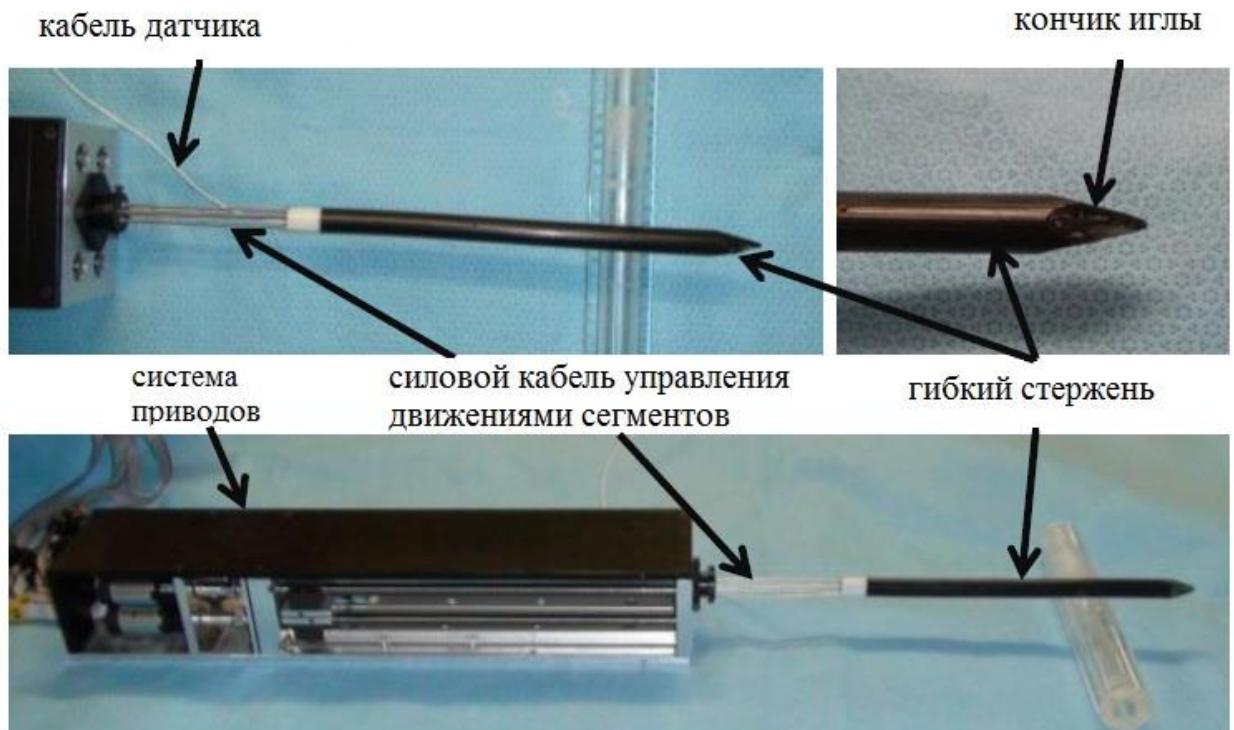


Рисунок 1.24 – Макет системы привод-игла

Получается достаточно сложная и громоздкая геометрическая конструкция, с большим набором функций для решения необходимых задач. В работе была разработана математическая модель движения иглы по криволинейной траектории, собран макет и проведены эксперименты по точности позиционирования. Управление движением иглы по криволинейной траектории осуществляется с помощью компьютера с установленным программным обеспечением – Labview, на базе которого был разработан пользовательский интерфейс. Вся система, представленная на рисунке 1.25, она состоит из: компьютера, контроллера управления, контроллера управления низкого уровня, системы приводов, гибкой иглы и камеры.

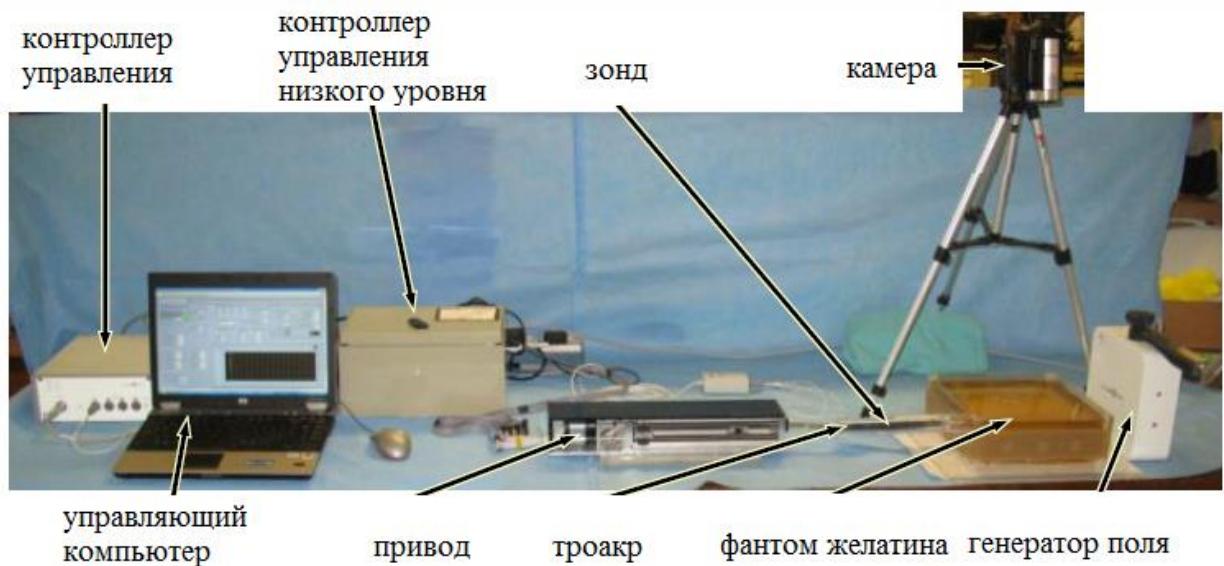


Рисунок 1.25 – Система управления криволинейным движением иглы

Реализацию криволинейной траектории данной иглы на практике мы можем видеть на рисунке 13.

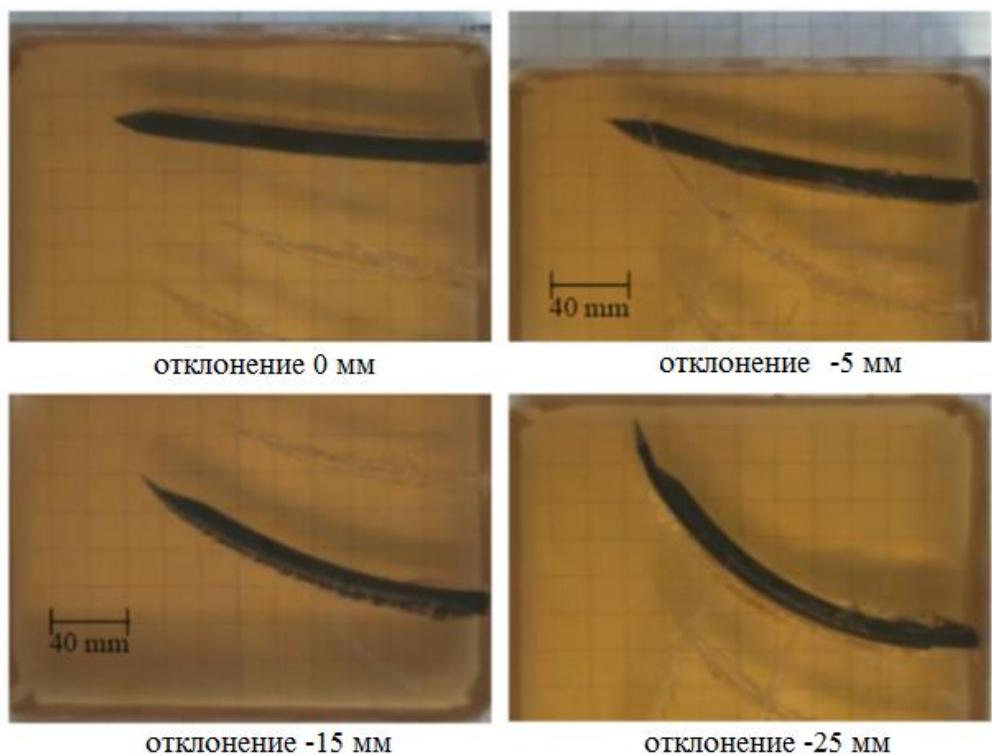


Рисунок 1.26 – Движение иглы по криволинейной траектории с различным смещением

В результате проведённых экспериментов, Seong, Luca и Ferdinando получили результаты, которые сравнили с результатами других работ.

Точность позиционирования получилась достаточно высокая – $0,68\pm1,45$ мм.

Результаты сравнения отображены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение результатов позиционирования гибких игл различными методами

Исследование	Метод	Минимальный радиус кривизны, мм	Максимальная кривизна, мм^{-1}	Точность, мм	Ткань	Способ измерения
Webster 2006	Разомкнутый контур	222,7	0,0045	-	Фантом мышечной ткани, желатин	камера
Minhas 2007	Разомкнутый контур	51,6	0,019	-	Фантом мозга, желатин	камера
Read 2008	Релейный	61,0	0,016	-	Фантом ткани, пластизол	камера
Minhas 2009	Рабочий цикл	-	-	$1,80\pm1,33$	Мозг человека	Рентгеноскопия
Wood 2010 [Рабочий цикл с обратной связью	333,3	0,003	0,71	Фантом печени, медицинский тренажор	Камера
Seong 2010	Программируемый кончик	178,6	0,0056	$0,68\pm1,45$	Фантом мозга, желатин	Электро-магнитный датчик

*- отсутствие данных в работе.

Рассмотренная конструкция гибкой иглы имеет ряд отличительных особенностей:

- не стандартный подход к принципу реализации криволинейной траектории движения иглы;
- конструктивное исполнение стержня иглы, повышающее функционал по сравнению с гибкой иглой классического типа;

- наличие системы приводов и управления на базе компьютера с пользовательским интерфейсом;

Если рассматривать данный конструктив для решения задач брахитерапии с низкодозным облучением, нельзя не обратить внимание на очень большой диаметр иглы – 12,5 мм. При таком диаметре, все возможности данного прототипа применительно к брахитерапии сводятся к нулю, из-за трудностей, возникающих при решении обхода мягких тканей, костей, препятствий иного рода, которые можно обойти при диаметре иглы не больше 1-2 мм не задев и не повредив их.

Swaney, в работе [7] предлагает для повышения управляемости иглы и увеличения кривизны траектории придать степень свободы асимметричному кончику иглы. Конструктивное исполнение представлено на рисунке 1.27. Принцип действия данной иглы идентичен принципу действия гибкой иглы классической конструкции – гибкий нержавеющий металл с асимметричным кончиком, и осуществляется за счёт неравномерного распределения силы на кончик иглы из-за его асимметричности. А дополнительная степень свободы позволяет увеличить угол отклонения и тем самым повысить манёвренность иглы, что характерно заметно на рисунке 1.28.

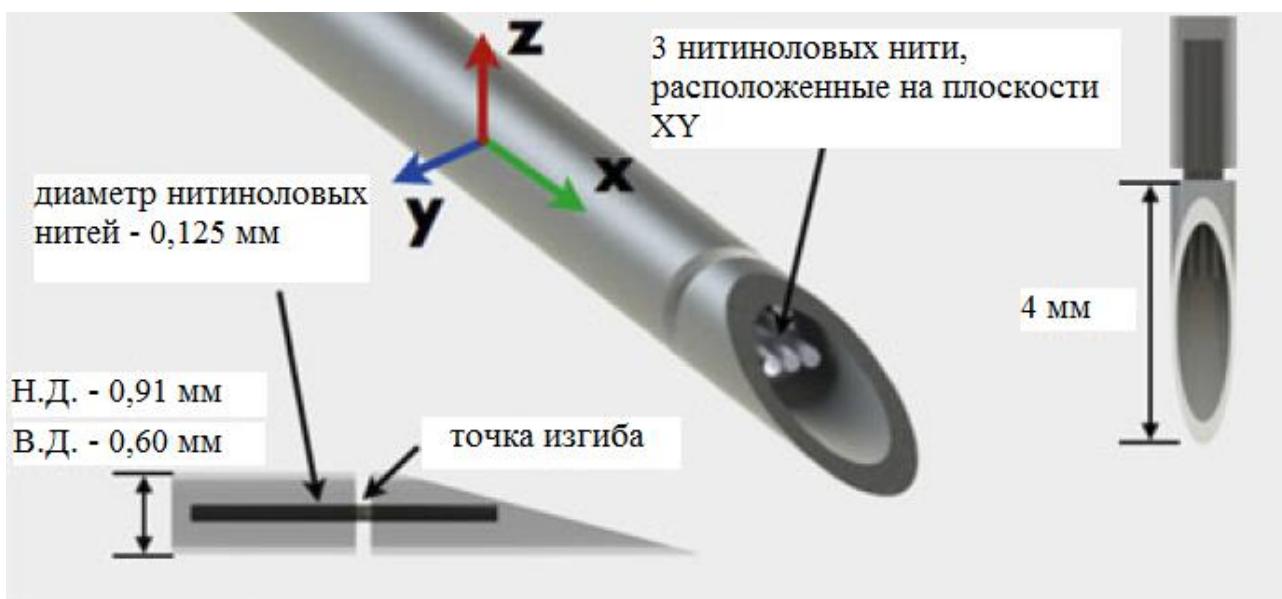


Рисунок 1.27 – Конструкция гибкой иглы с управляемым кончиком.

В теле иглы по всей его длине располагаются нитиноловые нити, которые соединяют кончик иглы с телом. С помощью холодной пайки, нити закрепляются в асимметричном кончике. Сам кончик не имеет контакта с телом иглы, что даёт ему степень свободы. Таким образом, при взаимодействии с тканью, под воздействием силы на асимметричный кончик, игла начинает отклоняться от прямолинейной траектории, в результате возникает угол отклонения и радиус кривизны. Наличие степени свободы у кончика позволяет увеличить угол отклонения, тем самым повышая манёвренность иглы и её управляемость. Характерно это показано на рисунке 1.28.

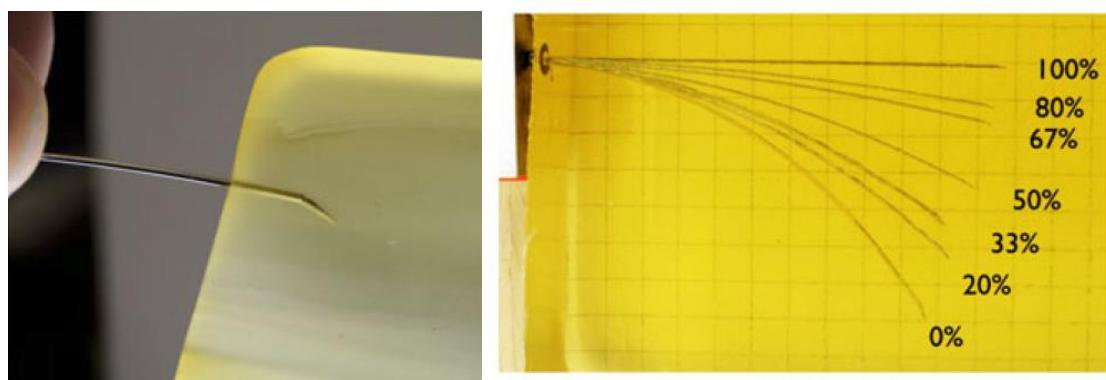


Рисунок 1.28 – Угол отклонения гибкой иглы с управляемым кончиком .

Проводя исследования по использованию данной иглы, разработчики также уделили внимание вопросу повреждения тканей во время инъекций. Поэтому, помимо задачи повышения управляемости решалась задача по минимизации повреждения тканей во время инъекции иглы и её движения по криволинейной траектории. В работе был проведён эксперимент, в котором сравнивались повреждения от трёх типов игл, представленных на рисунке 1.29:

- игла с асимметричным управляемым кончиком;
- игла с асимметричным кончиком;
- игла с асимметричным загнутым кончиком;

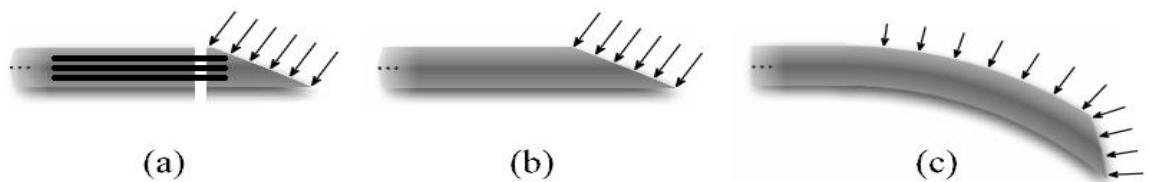


Рисунок 1.29 – Виды гибких игл (а) – игла с управляемым ассиметричным кончиком; (б) – игла с ассиметричным кончиком; (с) – игла с ассиметричным изогнутым кончиком

В результате эксперимента было установлено, что конструктивное исполнение вариантов (а) и (б) оставляет наименьшие повреждения ткани во время перемещения, что можно видеть на рисунке 1.30. При этом вариант (а) управляется лучше, чем вариант (б).

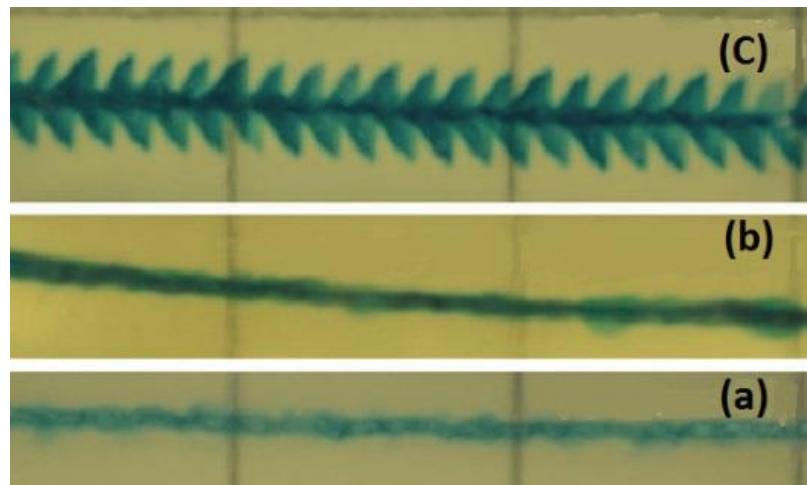


Рисунок 1.30 – Степень повреждения ткани в зависимости от использования различных игл: (а) – игла с управляемым ассиметричным кончиком; (б) – игла с ассиметричным кончиком; (с) – игла с ассиметричным изогнутым кончиком

Однако, в случае с конструктивным исполнением (а) есть риск надлома и разрыва соединения между стержнем иглы и её наконечником, что может привести к срыву операции и повреждению тканей. К тому же, учитывая наличие нитиноловых нитей, связывающих кончик и стержень иглы, в стержне необходимо предусмотреть канал, по которому будут доставляться микроисточники. Это усложняет конструкцию иглы и накладывает

дополнительные требования на прочность соединения и надёжность такого подхода к конструкции всей иглы.

Ещё одной альтернативой вариантам, описанным выше, является гибкая игла с памятью формы или, так называемая умная игла. В работах [8],[9] при рассмотрении вопроса доставки микроисточников в область простаты для уменьшения количества используемых игл и снижения риска облучения тканей и органов применили подход с использованием материала с памятью формы на основе сплава никеля и титана - нитинола. Идея реализована в трёх конструктивных исполнениях, которые представлены на рисунке 1.31

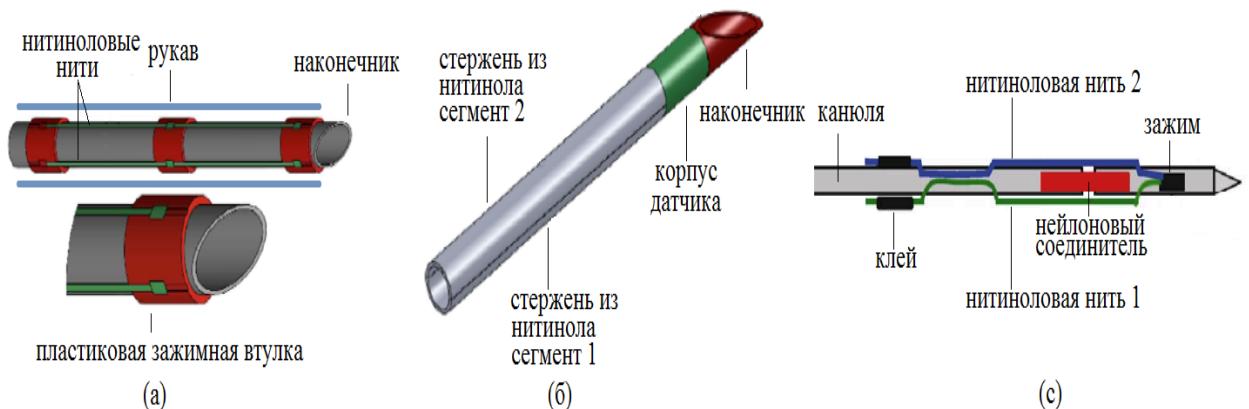


Рисунок 1.31 – Конструктивное исполнение гибких игл с памятью формы, (а) – нити крепятся с внешней стороны к пластиковым втулкам, (б) – сам стержень состоит из нитинола, (с) – нитиноловые нити крепятся с внешней стороны и закрепляются в зажиме гибкого наконечника симметричным кончиком

Конструктивное исполнение (а) состоит из продольных сегментов стержня, соединённых между собой не металлическими, пластиковыми втулками, что повышает манёвренность иглы. Втулки не проводят ток. С внешней стороны тела иглы к ним крепятся четыре нитиноловых провода по всей длине иглы на каждый сегмент. Таким образом, смещение иглы и скорость смещения зависят от мощности, подаваемой на нитиноловые провода. В случае с конструктивным исполнением (б) разница состоит в том, что само тело иглы является сплавом никеля и титана и сочленяется из двух

половинок по всей длине. Каждый такой сегмент является исполнительным механизмом по отношению к кончику иглы. Для контроля управления у основания кончика установлен датчик для сигнала обратной связи по положению. Для отклонения иглы вниз, необходимо подать такое усилие на сегмент 2, чтобы в противоположной точке возникло нужное нам отклонение. Конструкция иглы схожа с конструкцией классической гибкой иглы изображённой на рисунке 1.29 (b) с асимметричным кончиком. Конструктивное исполнение (c) похоже на вариант (a) с тем отличием, что игла разделена на головку с симметричным кончиком и стержень и соединяется с помощью нейлонового соединителя, как дополнительной степени свободы. Таким образом, данная конструкция обладает не только памятью формы, но и управляемым кончиком, что повышает манёвренность иглы.

Все три представленных варианта разработаны на базе сплава нитинола, который обладает свойством памяти формы при определённых температурных воздействиях. Если ограничить внешнее воздействие на, специальным образом, обработанный нитиноловый элемент лишь нагревом и охлаждением в температурном интервале завершенных аустенитно-мартенситных превращений, то элемент станет самопроизвольно изгибаться, как при нагреве, так и при охлаждении, реализуя эффект обратимой памяти формы. В сочетании с вращением иглы вокруг своей оси это позволяет реализовывать сложную траекторию движения для обхода чувствительных тканей, органов и других препятствий. При этом, для закладки нескольких источников с разными координатами позиционирования в область опухоли может быть использована одна игла, в отличие от классического прямолинейного подхода в проведении операций брахитерапии с низкодозным облучением, как показано на рисунке 1.32.

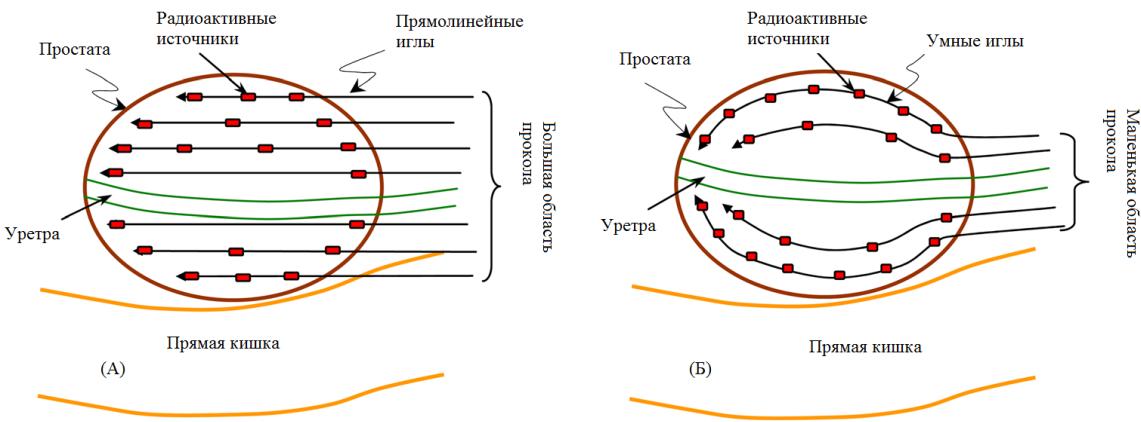


Рисунок 1.32 – Варианты доставки микроисточников, (А) – классический прямолинейный способ, (Б) – перспективный криволинейный способ с использованием умных игл.

На данном этапе исследований иглы с памятью формы выглядят наиболее перспективной разработкой, однако сложны в реализации своей конструкции.

Таким образом, мы рассмотрели различные подходы к проектированию, разработке и реализации гибких игл. Каждый из представленных вариантов имеет преимущества перед другими. Основными критериями выбора конструкции гибкой иглы являются простота в реализации, надёжность, манёвренность (способность иглы к изгибу для обхода органов, костей и мягких тканей), заданная точность позиционирования. При выборе конструктива гибкой иглы, в соответствии с перечисленными выше требованиями, следует обратить внимание, на то, что большинство гибких игл для брахитерапии, описанных в научной литературе и представленных на рынке на сегодняшний день являются прямолинейными и представляют собой канюлю и стилет, который перемещается внутри канюли [10]. То есть, вариант рассмотренный в работе [5] и изображённый на рисунке 1.15, учитывая полученные данные о точности позиционирования, простоту реализации, манёвренность стилета, позволяет с уверенностью говорить о возможности применения данного подхода для реализации криволинейной траектории движения иглы или стилета применительно к операции брахитерапии. Однако, в описанной работе [5] остался без

внимания вопрос разработки математического моделирования предложенного технического решения по доставке и закладке микроисточников.

Предложенная модель и результаты экспериментальных исследований движения стилета по криволинейной траектории не учитывают ряд факторов, могущих оказывать негативное воздействие на процесс доставки и закладки микроисточников. А именно, не затрагивается вопрос прохождения криволинейного пути стилета вместе с микроисточником. Для реализации данного этапа операции необходимо, чтобы путь, создающий некую пустоту в ткани и проделанный стилетом после его возвращения в канюлю, для последующего прохождения этого же пути, но уже с микроисточником, не затекал тканью, необходимо предусмотреть механизм предотвращающий данное затекание.

Таким образом, для конструктивного варианта, изображённого на рисунке 1.15, предлагается ввести ряд улучшений и рассмотреть три варианта решения данной проблемы:

- использовать промежуточную прослойку между стилетом и стержнем для сохранения криволинейного пути, которая представляет рукав в виде гибкой и в тоже время жёсткой трубки из материала ПВХ, способной выдержать давление ткани на внешние стенки, связанные со стилетом общим механизмом поступательного перемещения с возможностью фиксировать трубку при достижении нужной точки в области опухоли для дальнейшей закладки микроисточника (Рисунок 1.33);
- обработка стилета необходимым химико-биологическим раствором, при взаимодействии с которым, во время прохождения пути, ткань на непродолжительное время в интервале, например, от 30-60 секунд фиксировалась бы в своём положении, что позволило бы беспрепятственно доставить и заложить микроисточник;

- определённое физическое воздействие стилета во время прохождения криволинейного пути на ткань таким образом, чтобы ткань фиксировала своё положение, для доставки и закладки микроисточника;

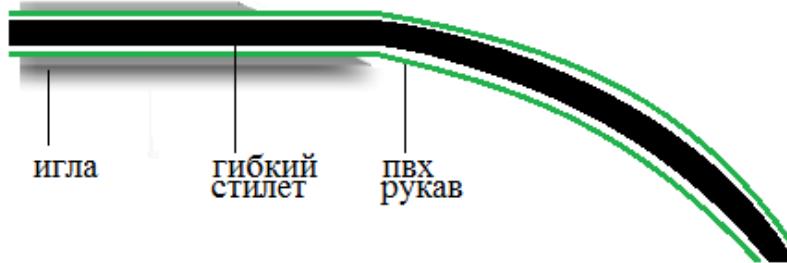


Рисунок 1.34 – Конструктивное исполнение системы игла-стилет вместе с ПВХ рукавом для защиты криволинейного пути от воздействия ткани

Рассмотренные варианты являются улучшением к конструктивному исполнению, изображённому на рисунке 1.15, и требуют дополнительного изучения, поскольку без экспериментов достаточно трудно оценить сложность реализации и удовлетворить всем требованиям.

Альтернативой может послужить наиболее часто встречаемый и наиболее исследованный вариант гибкой иглы с асимметричным кончиком, изображённой на рисунке 1.29 (b). Основным отличием является то, что игла исполняет роль стилета. Это упрощает процесс доставки и закладки источника, поскольку нет необходимости проходить криволинейный путь дважды. В данном случае игла и является препятствием на пути затекания ткани, поэтому не требуется дополнительного рукава. Но и здесь есть свои недостатки. В первую очередь это связано с попаданием ткани в канал иглы, по которому доставляется источник. Это может привести к затруднению его доставки и закладки в нужную точку. На практике, при прямолинейной закладке, данная проблема решается за счёт стилета, который служит в качестве уплотнителя, не дающего проникать ткани в путеводный канал. Но даже в этом случае присутствует вероятность попадания кусочков ткани в зазоры между стилетом и телом иглы, что может привести к загрязнению канала. Решением может послужить смещение отверстия с торцевой поверхности иглы на цилиндрическую, как показано на рисунке 1.35.

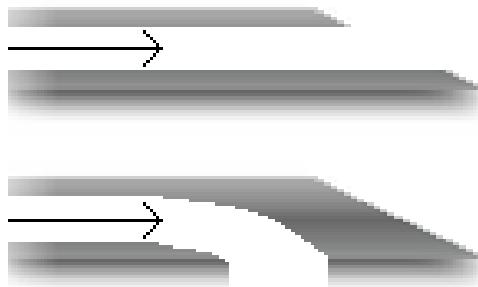


Рисунок 1.35 – Вариант закладки микроисточника в зависимости от выходного отверстия

Таким образом, при рассмотрении различных вариантов конструктивного исполнения гибких игл был выбран наиболее оптимальный по ряду соображений описанных выше. Переядём к математическому описанию предложенных моделей движения кончика иглы по криволинейной траектории.

1.3 Структура и параметры математического моделирования

Основным объектом исследования в данном разделе является медицинская игла, контактирующая со средой, моделирующей тело пациента. В качестве основных уравнений будем использовать уравнения изгиба тонкого упругого криволинейного стержня, ось которого, как в недеформированном, так и в деформированном состоянии лежит в одной плоскости. Относительно формы стержня будем использовать единственное предположение, что недеформированная срединная линия его является достаточно гладкой кривой. По мере своего продвижения в теле пациента, под действием реакции окружающих тканей игла деформируется, что существенным образом влияет на траекторию ее движения. Помимо этого, представляется важным уметь оценивать величины усилий и моментов, возникающих на линии контакта иглы с окружающими тканями, поскольку от этого напрямую зависит масштаб травматических повреждений последних.

Структуру определим как механический подход, описывающий движение кончика иглы по криволинейной траектории, параметры математического моделирования подробно рассмотрим в разделе 2.

В разделе проведён обзор научно-технической литературы по математическому моделированию движения кончика иглы по криволинейной траектории. Рассмотрены различные подходы к созданию математических моделей. Описаны технические решения и подходы к конструктивному исполнению гибких игл. Предложены к рассмотрению альтернативные варианты конструкций для решения задачи доставки микроисточников в область опухоли. Определены основные параметры и структура математического моделирования

2 Разработка математической модели движения кончика иглы в теле пациента по криволинейной траектории

2.1 Основные уравнения

Для механического описания медицинской иглы будем использовать уравнения изгиба тонких гибких стержней [11].

Рассмотрим гибкий криволинейный стержень в плоскости xOy изображённый на рисунке 2.1.

Ось стержня задана параметрически:

$$x = x(\alpha), \quad y = y(\alpha) \quad (11)$$

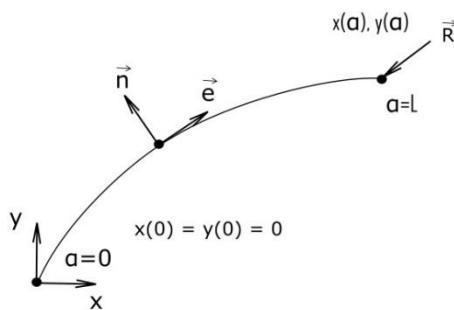


Рисунок 2.1 – Гибкий криволинейный стержень

Выражение для вычисления коэффициента Ламе [11] имеет вид:

$$A(\alpha) = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\alpha}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\alpha}\right)^2} \quad (12)$$

Кривизна оси стержня определяется выражением:

$$\kappa(\alpha) = \frac{\frac{dx}{d\alpha} \frac{d^2y}{d\alpha^2} - \frac{dy}{d\alpha} \frac{d^2x}{d\alpha^2}}{\left[\left(\frac{dx}{d\alpha}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\alpha}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (13)$$

Уравнения равновесия стержня запишем в виде:

$$\frac{1}{A} \frac{dT}{d\alpha} + \frac{N}{R} + p_T = 0, \quad \frac{1}{A} \frac{dN}{d\alpha} - \frac{T}{R} + p_N = 0, \quad \frac{1}{A} \frac{dM}{d\alpha} + N = 0 \quad (14)$$

Здесь T, N – тангенциальная и перерезывающая силы; M – изгибающий момент; $p_T(\alpha)$ и $p_N(\alpha)$ – тангенциальная и нормальная компоненты распределенной нагрузки; $A(\alpha)$ – параметр Ламе; $R(\alpha) = 1/\kappa(\alpha)$ – радиус

кривизны стержня. Положительные направления усилий и моментов изображены на рисунке 2.2.

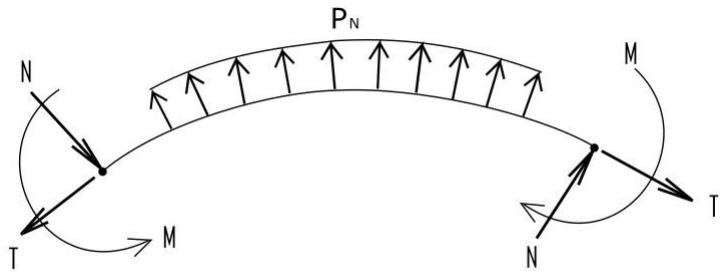


Рисунок 2.2 – Положительные направления усилий и моментов

Для деформаций срединной линии стержня имеем выражения:

$$\varepsilon = \frac{1}{A} \frac{du}{d\alpha} + \frac{w}{R}, \quad \theta = -\frac{1}{A} \frac{dw}{d\alpha} + \frac{u}{R}, \quad \kappa = \frac{1}{A} \frac{d\theta}{d\alpha} \quad (15)$$

Здесь ε и κ – деформации растяжения и изгиба соответственно; θ – угол поворота поперечного сечения; u и w – тангенциальная и нормальная компонента смещения.

Связь между усилиями в сечении стержня (14) и деформациями (15) устанавливается соотношениями

$$T = B\varepsilon, \quad M = G\kappa, \quad (16)$$

где B и G – жесткости на растяжение и изгиб. Для стержней постоянного кругового сечения имеем:

$$B = \frac{\pi D^2}{4} E, \quad G = \frac{\pi D^4}{64} E. \quad (17)$$

Здесь D – диаметр сечения; E – модуль Юнга.

Для стержня кольцевого сечения будет иметь место:

$$B = \frac{\pi D^2}{4} \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) E, \quad G = \frac{\pi D^4}{64} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) E. \quad (18)$$

Здесь d – внутренний диаметр сечения.

Специфика рассматриваемой задачи накладывает дополнительные условия на распределенную нагрузку, являющуюся реакцией среды на воздействие иглы. Обсудим этот вопрос подробнее.

Очевидно, что тангенциальная нагрузка p_T со стороны среды на боковую поверхность иглы при расчете напряженного состояния является

величиной пренебрежимо малой, в сравнении с нормальной компонентой. Поэтому в дальнейшем рассмотрении примем $p_T(\alpha) \equiv 0$.

Для нормальной компоненты нагрузки для участка длины иглы $0 < \alpha < \alpha_0$, не контактирующего со средой, также имеем $p_N(\alpha) \equiv 0$.

При $\alpha_0 < \alpha < L$, то есть на участке длины иглы, находящейся в контакте со средой, нормальная компонента нагрузки обусловлена реакцией среды на нормальную компоненту перемещения. В качестве гипотезы примем, что реакция среды прямо пропорциональна величине этого перемещения. Коэффициент пропорциональности k является характеристикой среды. Имеем:

$$p_N(\alpha) = -kw(\alpha). \quad (19)$$

Для моделирования с помощью уравнений (14-19) поведения медицинской иглы в теле пациента необходимо дополнить ее граничными условиями, отвечающими специфике задачи.

Левый конец стержня ($\alpha = 0$) будем считать жестко защемленным:

$$u(0) = 0, \quad w(0) = 0, \quad \theta(0) = 0. \quad (20)$$

На правом конце стержня ($\alpha = L$) зададим граничные условия в усилиях:

$$N(L) = 0, \quad M(L) = 0, \quad T(L) = T_L. \quad (21)$$

Система уравнений (4-9) имеет шестой порядок. Вместе с граничными условиями (20-21) она образует краевую задачу, решая которую определим форму деформированной иглы.

2.2 Разработка математической модели прямолинейной иглы

В случае прямолинейной иглы, ось которой расположена вдоль оси x , уравнения (14) упрощаются: $\alpha = x$, $R = \infty$, $A = 1$. Уравнения равновесия примут вид:

$$\frac{dT}{dx} + p_T = 0, \quad \frac{dN}{dx} + p_N = 0, \quad \frac{dM}{dx} + N = 0 \quad (22)$$

Выражения для деформаций запишутся в виде:

$$\varepsilon = \frac{du}{dx}, \quad \theta = -\frac{dw}{dx}, \quad \kappa = \frac{d\theta}{dx} \quad (23)$$

Таким образом, уравнения растяжения и изгиба могут решаться независимо и соответствующие системы имеют второй и четвертый порядок соответственно. Соотношения (22-23) совпадают с широко известными уравнениями растяжения и изгиба прямых стержней [11].

2.3 Разработка математической модели круговой иглы

В случае круговой иглы радиуса R точку на срединной поверхности будем идентифицировать при помощи угловой координаты φ . Тогда $A = R$ и уравнения равновесия примут вид:

$$\frac{dT}{d\varphi} + N + Rp_T = 0, \quad \frac{dN}{d\varphi} - T + Rp_N = 0, \quad \frac{dM}{d\varphi} + RN = 0 \quad (24)$$

Для деформаций имеем выражения:

$$\varepsilon = \frac{1}{R} \frac{du}{d\varphi} + \frac{w}{R}, \quad \theta = -\frac{1}{R} \frac{dw}{d\varphi} + \frac{u}{R}, \quad \kappa = \frac{1}{R} \frac{d\theta}{d\varphi} \quad (25)$$

Таким образом, уравнения круговой иглы являются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Решение последней системы, так же как и для прямолинейного стержня, может быть записано в замкнутой форме.

2.4 Разработка математической модели эллиптической иглы

Параметрические уравнения эллипса имеют вид ($0 \leq \alpha \leq 2\pi$):

$$\begin{cases} x(\alpha) = a \cos \alpha \\ y(\alpha) = b \sin \alpha \end{cases} \quad (26)$$

$$R_{tu}^1 = R_{z_{tu}}(\beta) \quad (27)$$

Здесь a и b – большая и малая полуоси эллипса. Тогда, согласно формулам (12-13), имеем:

$$A(\alpha) = \sqrt{a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha} \quad (28)$$

$$\kappa(\alpha) = \frac{ab}{[a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha]^{3/2}} \quad (29)$$

Последние выражения, будучи подставлены в формулы (14-16), приводят к системе линейных уравнений с переменными коэффициентами, решение которой приходится строить приближенными методами.

2.5 Решение краевой задачи

Запишем краевую задачу о деформации криволинейной иглы в среде, моделирующей тело пациента. Для этого разрешим соотношения (14-15) относительно производных, воспользуемся соотношениями (16) и учтем специфику распределенной нагрузки, характерную для рассматриваемой задачи, при помощи (19). Выберем в качестве параметра α длину дуги s срединной линии иглы. Тогда $A \equiv 1$. Получим:

$$\frac{du}{ds} = \frac{T}{B} - \frac{w}{R}, \quad \frac{dw}{ds} = \frac{u}{R} - \theta, \quad \frac{d\theta}{ds} = \frac{M}{G}, \quad \frac{dT}{ds} = -\frac{N}{R}, \quad \frac{dN}{ds} = \frac{T}{R} + kw, \quad \frac{dM}{ds} = -N. \quad (30)$$

Дополним систему (26) краевыми условиями:

$$u(0) = 0, \quad w(0) = 0, \quad \theta(0) = 0, \quad (31a)$$

$$N(L) = 0, \quad M(L) = 0, \quad T(L) = T_L. \quad (31b)$$

Границная задача (20-21) может быть решена методом прогонки [12]. Иными словами, построим решение граничной задачи в виде линейной комбинации решений трех вспомогательных начальных задач, удовлетворяющих условиям на левом конце промежутка интегрирования (31a).

Для удобства численного решения перепишем систему (30) в матричном виде:

$$\frac{dU}{ds} = MU, \quad (32)$$

где введены обозначения:

$$U = \begin{bmatrix} u \\ w \\ \theta \\ T \\ N \\ M \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{A}{R} & 0 & \frac{A}{B} & 0 & 0 \\ \frac{A}{R} & 0 & -A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A}{G} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{A}{R} & 0 \\ 0 & Ak & 0 & \frac{A}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -A & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Пусть теперь $U_1(s)$, $U_2(s)$, $U_3(s)$ – три решения системы (34), отвечающие начальным условиям

$$U_1(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad U_2(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad U_3(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

Будем искать решение граничной задачи в виде:

$$U(s) = a_1 U_1(s) + a_2 U_2(s) + a_3 U_3(s) \quad (36)$$

Очевидно, решение (35) удовлетворяет условиям (21а) на левом конце промежутка интегрирования.

Для удовлетворения граничным условиям на правом конце промежутка интегрирования должно выполняться соотношение:

$$\begin{bmatrix} T_1(L) & T_2(L) & T_3(L) \\ N_1(L) & N_2(L) & N_3(L) \\ M_1(L) & M_2(L) & M_3(L) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Решая последнюю систему, определим значения величин c_i в выражении (37). Значения перемещений и угла поворота на правом конце промежутка интегрирования определяются выражениями

$$\begin{aligned} u(L) &= c_1 u_1(L) + c_2 u_2(L) + c_3 u_3(L) \\ w(L) &= c_1 w_1(L) + c_2 w_2(L) + c_3 w_3(L) \\ \theta(L) &= c_1 \theta_1(L) + c_2 \theta_2(L) + c_3 \theta_3(L) \end{aligned} \quad (38)$$

В данном разделе разработана математическая модель движения кончика иглы по криволинейной траектории для игл с разными кончиками:

прямолинейным, сферическим и эллиптическим. Определены параметры математической модели, решена краевая задача о деформации иглы в среде, моделирующей тело пациента. Получена система уравнений для расчёта перемещений и углов поворота иглы, с помощью которой происходит управление движением иглы для обхода препятствий и жизненно важных тканей. На данном этапе исследований кроме разработки математической модели требуется провести численный расчёт параметров. Все необходимые для этого данные имеются. Расчёт произведён в разделе 3.

3 Проведение численного расчёта параметров движения иглы

Расчёт проведём для трёх типов игл: прямолинейная, круговая, эллиптическая.

3.1 Результаты расчётов для прямолинейной иглы

Рассмотрим прямолинейную иглу длины L . Изучим деформированное состояние такой иглы, которое возникает при введении иглы в среду, моделирующую тело пациента. В качестве первого этапа рассмотрим задачу о потере устойчивости прямолинейного стержня кругового сечения, упёртого в жесткую преграду. Уравнения равновесия (14) для данной задачи должны быть отнесены к деформированной оси стержня, в результате чего они будут содержать члены, учитывающие кривизны, что приведет к нелинейной задаче. Опуская подробности, будем полагать, что указанные выкладки проделаны и линеаризация получившихся уравнений проведена. Граничные условия возьмем в форме (31). Определим критическую силу T_L . Первое уравнение равновесия (22) дает (в отсутствие распределенной касательной нагрузки) постоянство осевого усилия в стержне: $T(x) = T_L$. Второе уравнение (14) примет вид:

$$\frac{dN}{dx} + T \frac{d^2w}{dx^2} - kw = 0. \quad (39)$$

С учетом третьего уравнения равновесия и соотношений (6), получим

$$G \frac{d^4w}{dx^4} + T \frac{d^2w}{dx^2} - kw = 0. \quad (40)$$

Последнее уравнение совпадает с уравнением для определения формы потери устойчивости стержня [12], но учитывает реакцию основания. Характеристическое уравнение имеет два вещественных и два чисто мнимых решения: $\pm\lambda_1$ и $\pm\lambda_2 i$,

где

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{-T + \sqrt{T^2 + 4kG}}{2G}}, \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{T + \sqrt{T^2 + 4kG}}{2G}} \quad (41)$$

Решение уравнения (35), удовлетворяющее условиям (31а) на левом конце, запишем в виде:

$$w = A[\lambda_1 \sin \lambda_2 x - \lambda_2 \operatorname{sh} \lambda_1 x] + B[\cos \lambda_2 x - \operatorname{ch} \lambda_1 x] \quad (42)$$

На правом конце должны выполняться условия: $w(L) = 0$ и $M(L) = 0$, откуда

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 \sin \lambda_2 L - \lambda_2 \operatorname{sh} \lambda_1 L & \cos \lambda_2 L - \operatorname{ch} \lambda_1 L \\ -\lambda_2^2 \cos \lambda_2 L - \lambda_1^2 \operatorname{ch} \lambda_1 L & \lambda_2^3 \sin \lambda_2 L - \lambda_1^3 \operatorname{sh} \lambda_1 L \end{vmatrix} = 0 \quad (43)$$

Уравнение (43) вместе с соотношениями (41) дает возможность определить значение критического усилия T_L , при которой игла потеряет устойчивость. Рассмотрим важный частный случай, когда реакции среды нет, то есть игла протыкает поверхность. Тогда

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = \lambda = \sqrt{\frac{T}{G}}. \quad (44)$$

Тогда уравнение (38) примет вид:

$$\operatorname{tg} \lambda L = \lambda L \quad (45)$$

Первый ненулевой корень этого уравнения имеет значение $\lambda L = 4.4934$. Откуда для критического усилия получаем формулу:

$$T_L = 20.2 \cdot \frac{G}{L^2} \quad (46)$$

Для стальной иглы с параметрами: $E = 2.0 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2$; наружный диаметр иглы, $D = 1 \text{ мм}$; внутренний диаметр иглы, $d = 0.8 \text{ мм}$; график зависимости критического усилия от длины иглы приведен на рисунке 3.1.

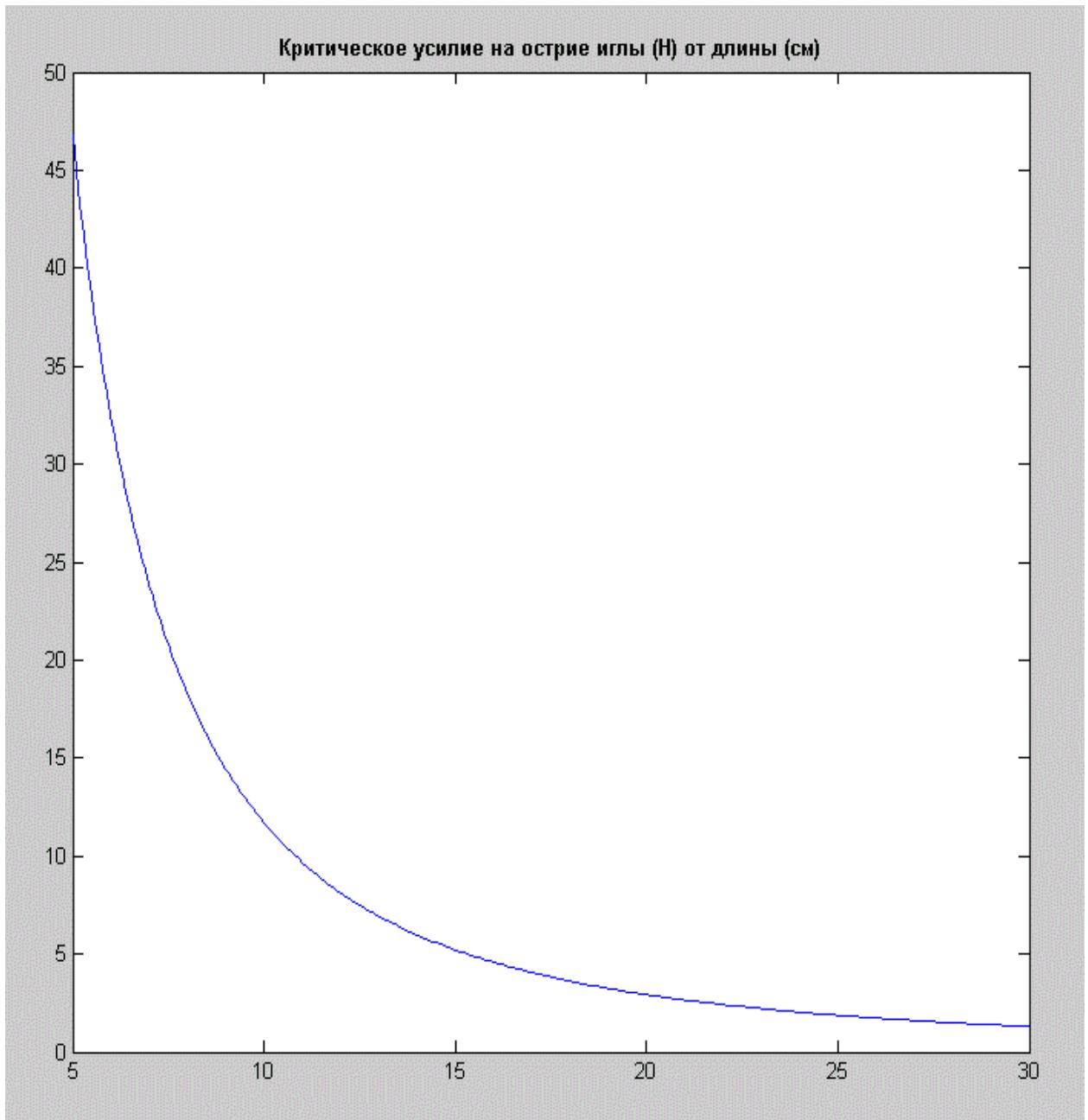


Рисунок 3.1 – Потеря устойчивости. Критическое усилие от длины.

3.2 Результаты расчётов для круговой иглы

Расчет напряженного состояния для круговой иглы выполнен для следующих исходных данных: материал иглы – сталь, $E = 2.0 \cdot 10^{11}$ Н/м²; радиус иглы, $R = 10$ см; наружный диаметр иглы, $D = 1$ мм; внутренний диаметр иглы, $d = 0.8$ мм; величина усилия на острие иглы, $T_L = 0.01$ Н; реакция среды, $k = 10$ Н/м². Длина иглы $L = 78.5$ мм, что соответствует 1/8 окружности: $0 \leq \varphi \leq \pi/4$. Результаты расчета приведены на рисунке 3.2.

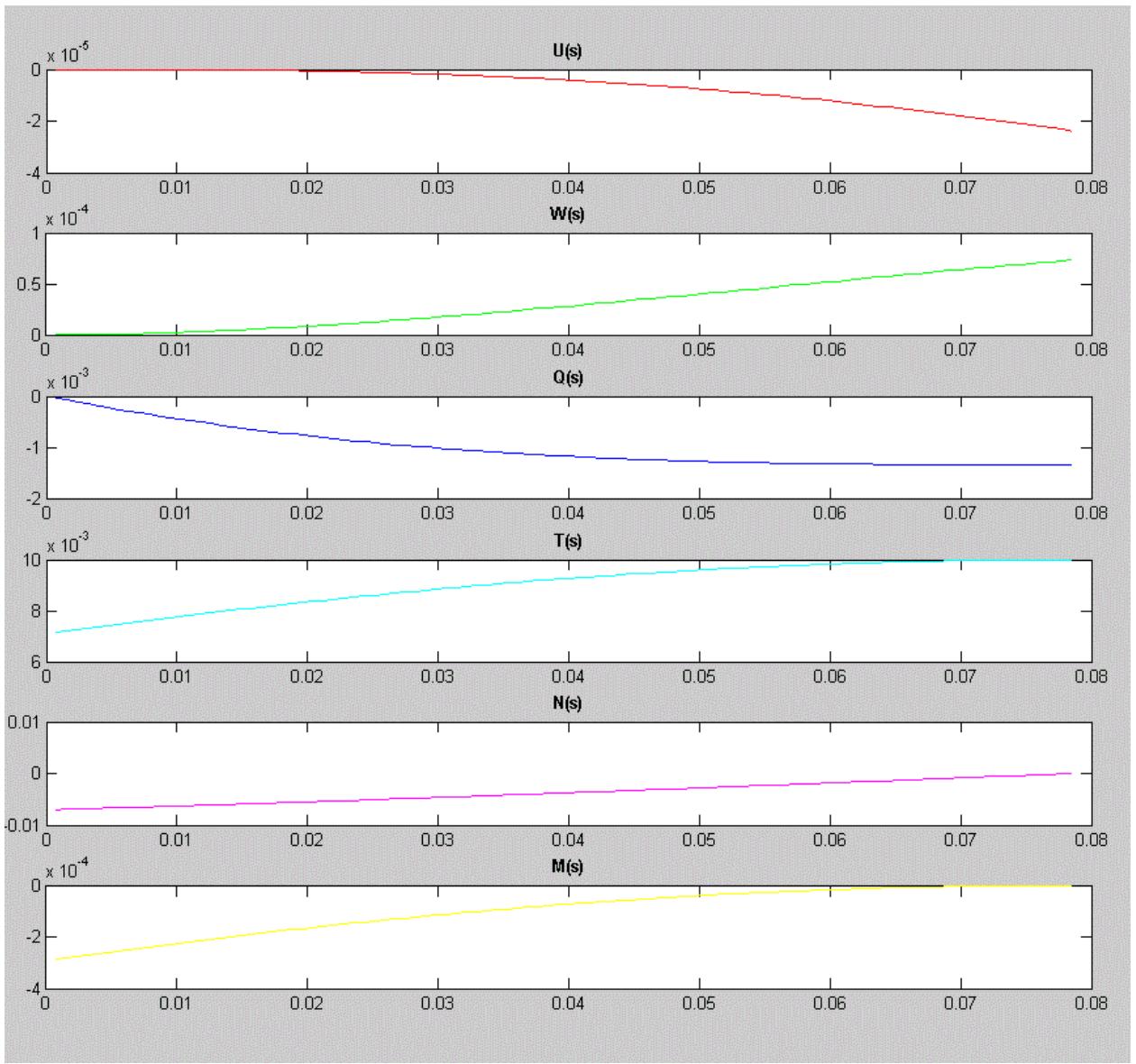


Рисунок 3.2 – Расчёт круговой иглы. $k = 10 \text{ н/м}^2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/4$

Максимум тангенциального перемещения достигается на острие иглы и составляет около 0.01мм. Перерезывающая сила и изгибающий момент обращаются на острие в ноль. Такие граничные условия обеспечивают минимальное травматическое воздействие на ткани.

Из второго графика видно, что максимум нормального перемещения принимает значение около 0.07 мм.

На рисунке 3.3 приведены результаты расчета для тех же исходных данных, но коэффициент реакции среды имеет значение $k = 50 \text{ н/м}^2$. Видно, что для данной конфигурации иглы изменение коэффициента реакции оказывает незначительное влияние на деформированное состояние.

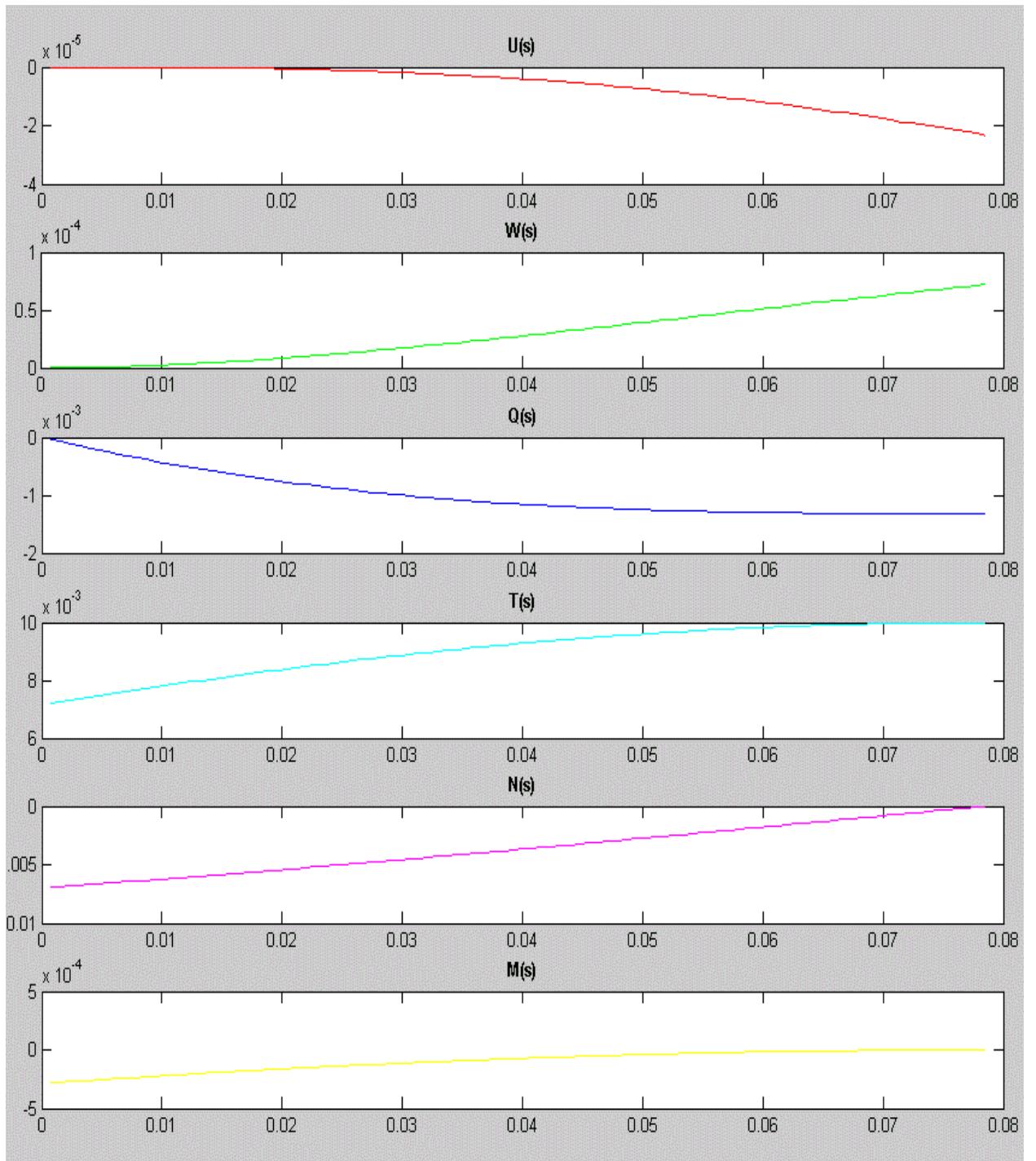


Рисунок 3.3 – Расчёт круговой иглы. $k = 50 \text{ н/м}^2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/4$

Следующий расчеты выполнены для прежних исходных параметров, но длина иглы теперь $L = 157\text{мм}$, что соответствует $1/4$ окружности, $0 \leq \varphi \leq \pi/2$. Результаты приведены на рисунках 3.4 и 3.5 соответственно. Сравнение позволяет сделать вывод, что в отличие от предыдущего случая, для рассматриваемой формы иглы влияние реакции среды на напряженное состояние необходимо учитывать.

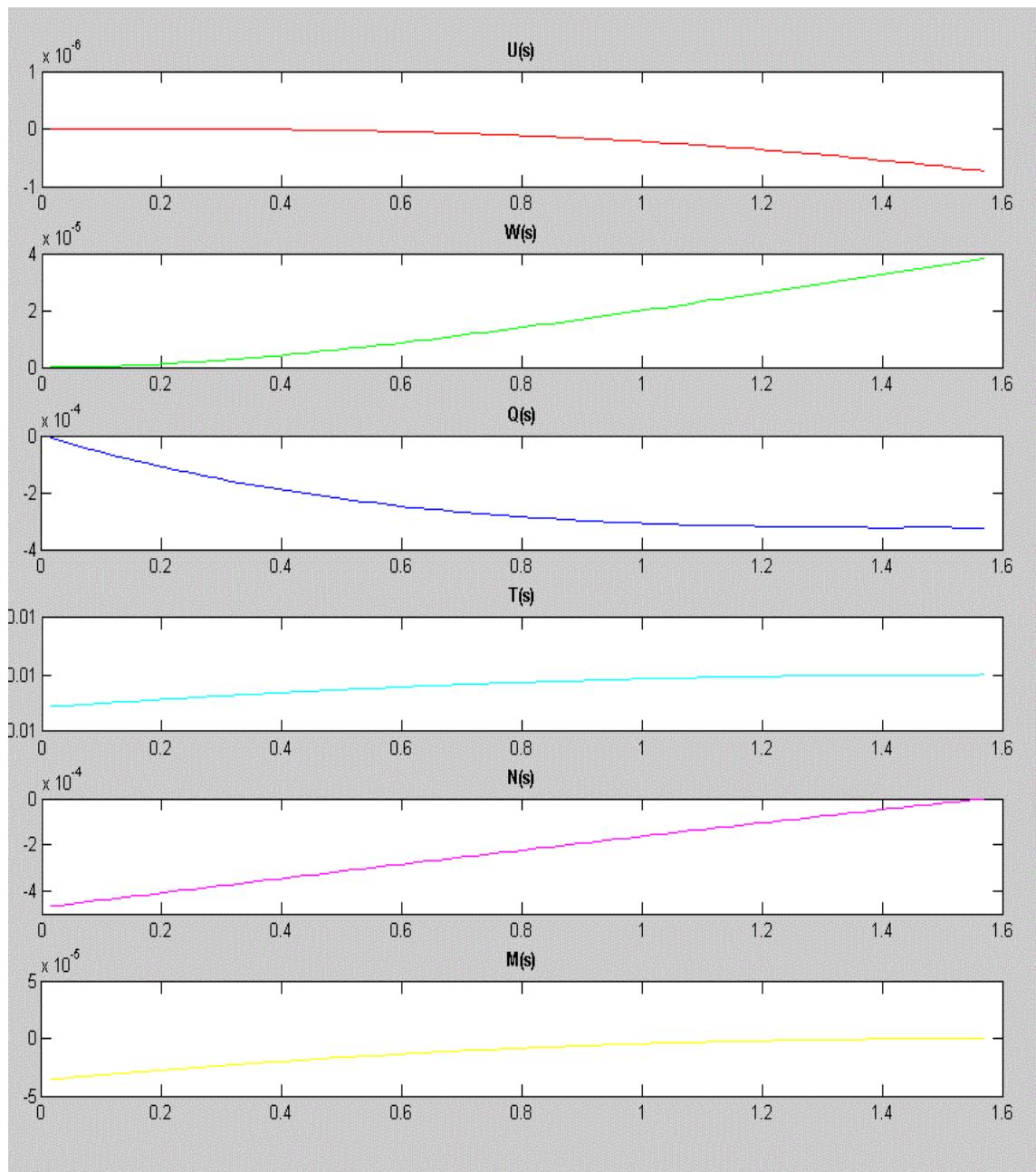


Рисунок 3.4 – Расчёт круговой иглы. $k = 10 \text{ н/м}^2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/2$

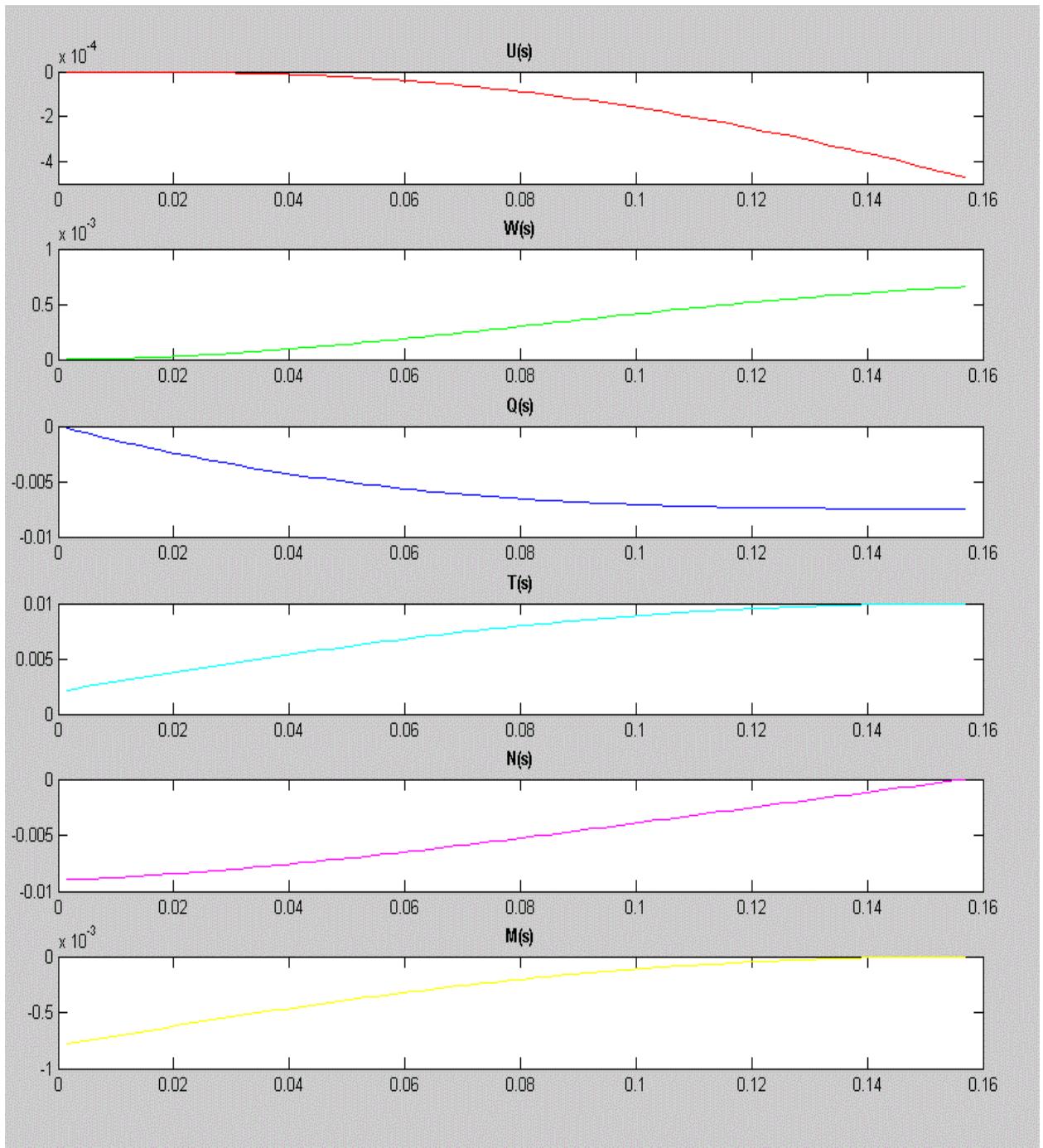


Рисунок 3.5 – Расчёт круговой иглы. $k = 50 \text{ н/м}^2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/2$

3.3 Результаты расчётов для эллиптической иглы

Расчет напряженного состояния эллиптической иглы выполнен для следующих исходных данных: материал иглы – сталь, $E = 2.0 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2$; малая и большая полуоси эллипса, $a = 5\text{см}$ и $b = 10\text{см}$; наружный диаметр иглы, $D = 1\text{мм}$; внутренний диаметр иглы, $d = 0.8\text{мм}$; величина усилия на острие иглы, $T_L = 0.01\text{н}$; реакция среды, $k = 10 \text{ н/м}^2$. $0 \leq \varphi \leq \pi/2$.

Результаты расчета приведены на рисунках 3.6 и 3.7 соответственно.

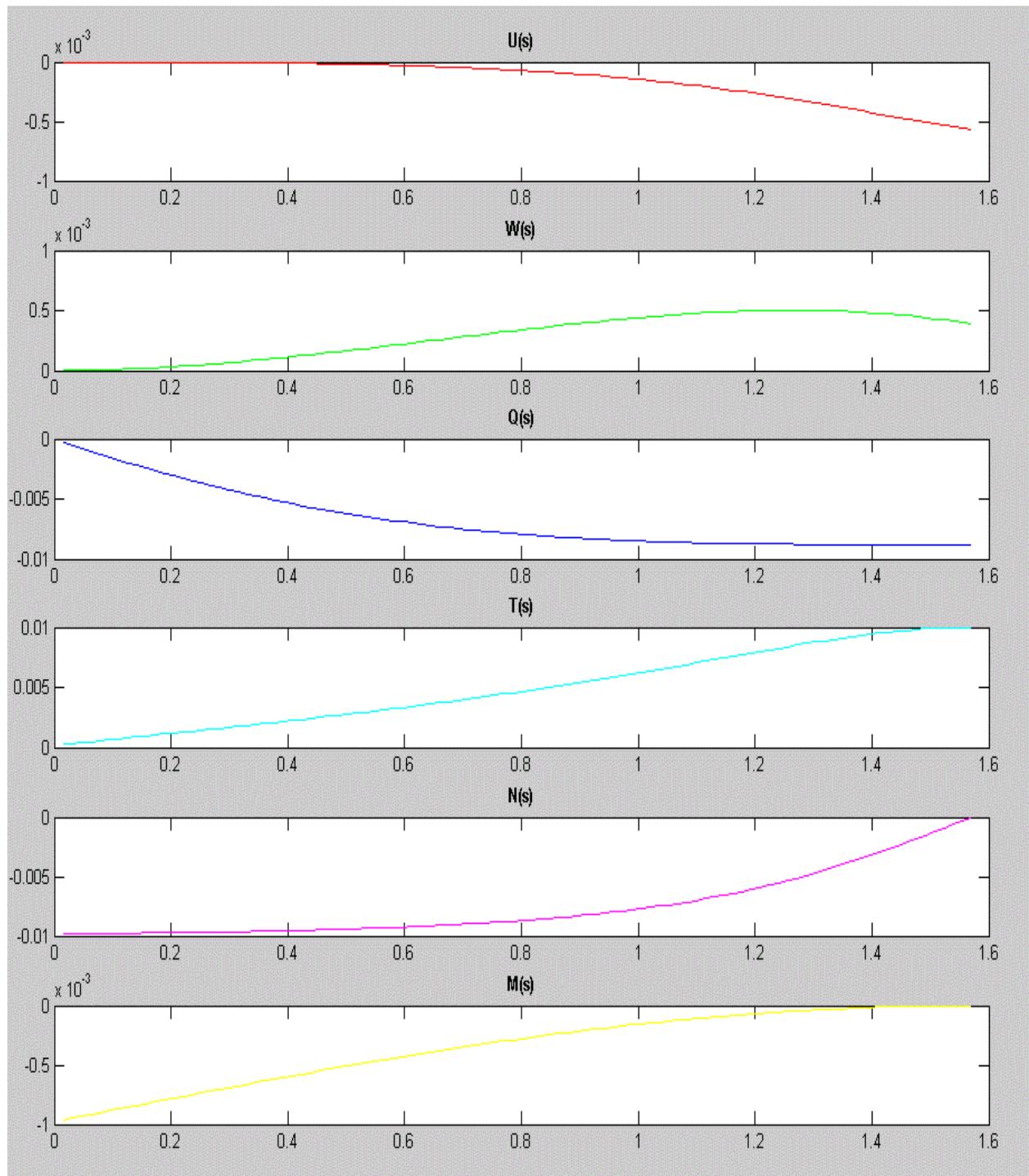


Рисунок 3.6 – Расчёт эллиптической иглы. $k = 10 \text{ н/м}^2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/2$

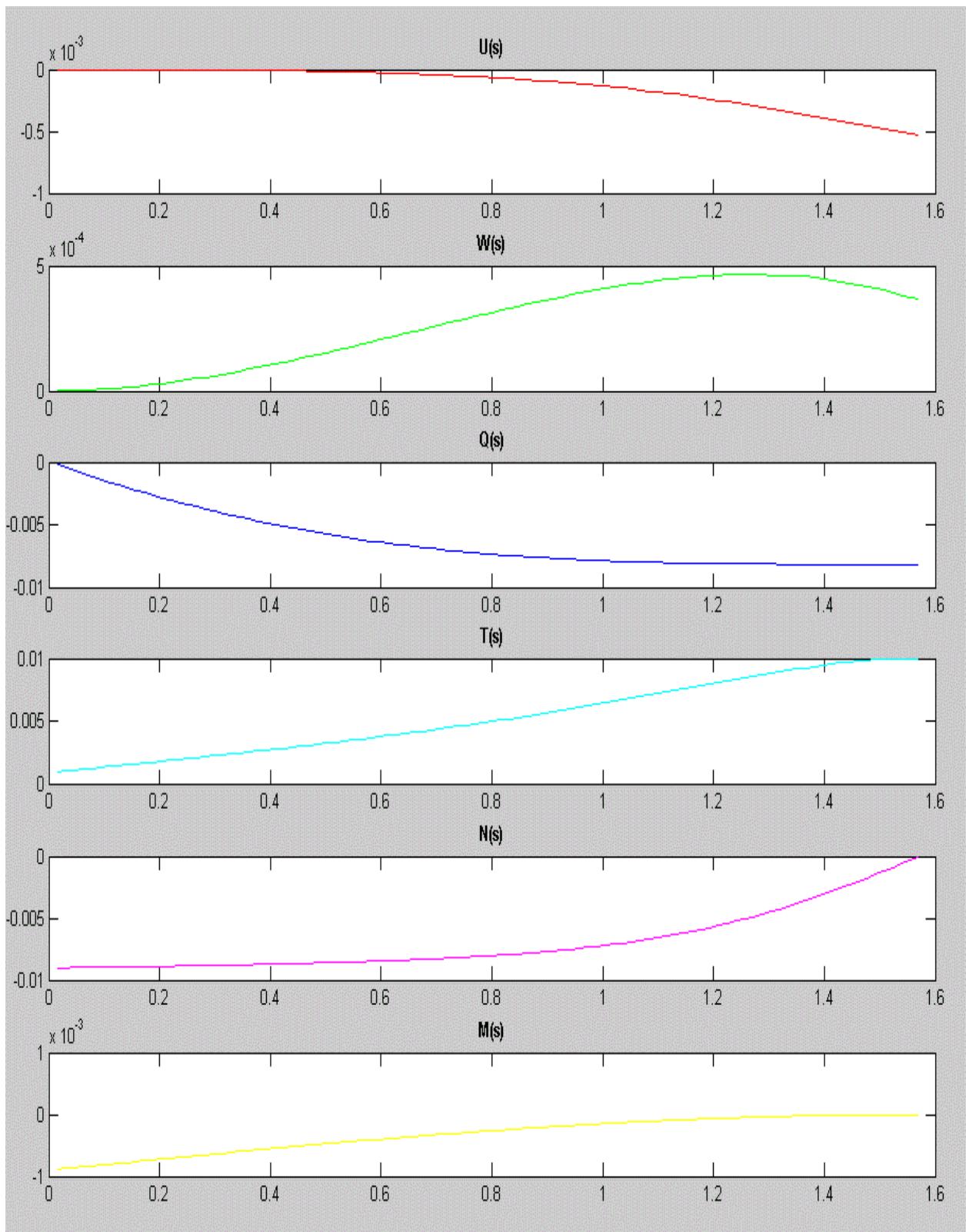


Рисунок 3.7 – Расчёт эллиптической иглы. $k = 50 \text{ н/м}^2$, $0 \leq \varphi \leq \pi/2$

Сравнение последних результатов расчета показывает, что для данной формы иглы реакция среды оказывает незначительное влияние на напряженное состояние.

Следующий расчет, изображённый на рисунке 3.8, демонстрирует напряженное состояние эллиптической иглы с большим эксцентрикитетом: $a = 1\text{мм}$, $b = 100\text{мм}$. Остальные данные остаются прежними. Видно, что вблизи правого конца иглы графики перемещений и усилий имеют вид характерного краевого эффекта, в то время как угол поворота сечения и изгибающий момент медленно меняются по всей длине иглы.

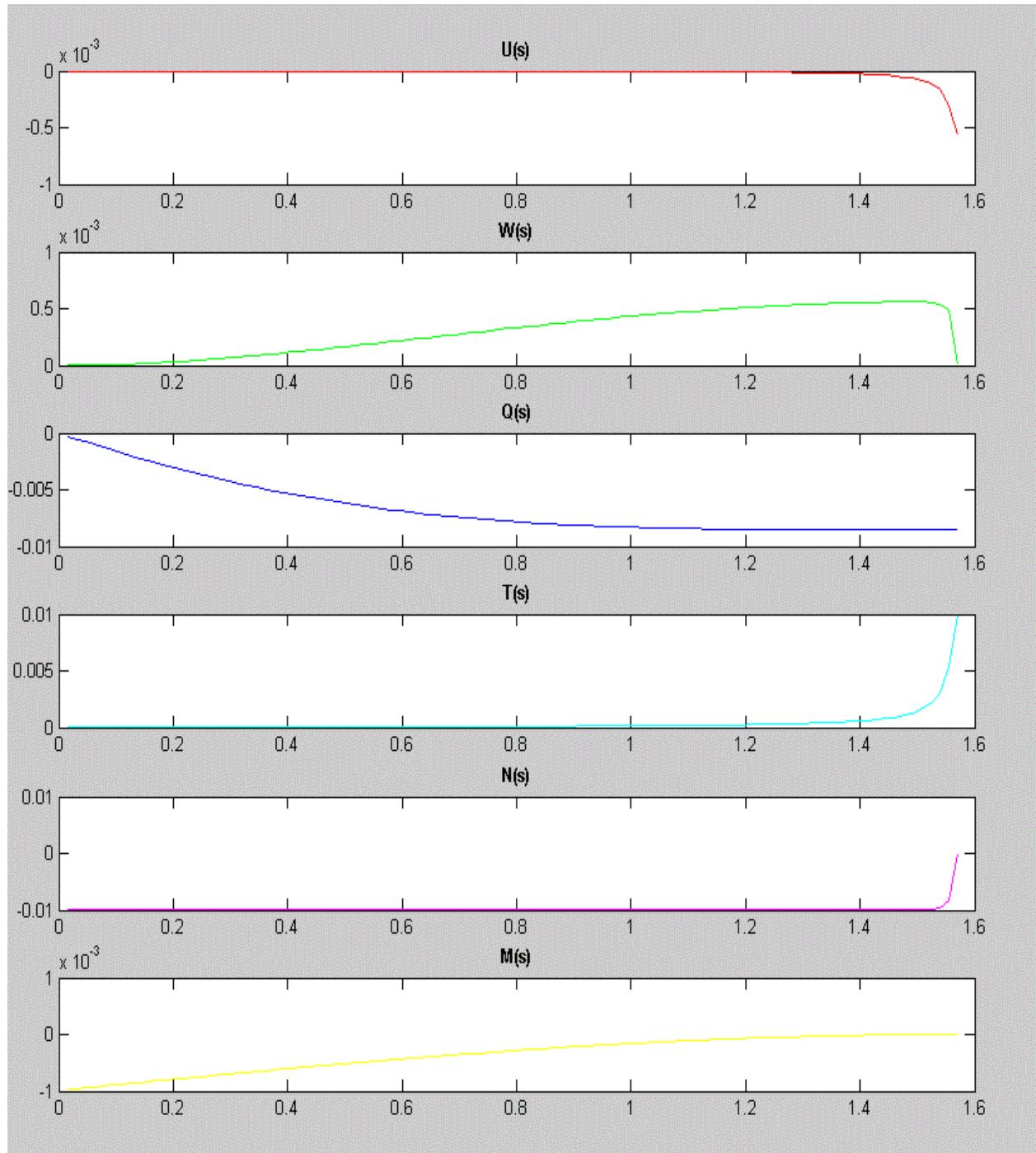


Рисунок 3.8 – Расчёт эллиптической иглы. $a = 1\text{мм}$, $b = 100\text{мм}$

В разделе проведены численные расчёты для всех типов рассматриваемых игл: прямолинейной, круговой, эллиптической. Получены существенные результаты, затрагивающие вопросы травматичности ткани, потери устойчивости при зависимости прилагаемых усилий от длины иглы. Получены графические интерпретации при различных параметрах различных типов игл.

По расчётам для круговой иглы с параметрами:

- материал иглы – сталь;
 - $E = 2.0 \cdot 10^{11}$ н/м²;
 - радиус иглы, $R = 10$ см;
 - наружный диаметр иглы, $D = 1$ мм;
 - внутренний диаметр иглы, $d = 0.8$ мм;
 - величина усилия на острие иглы, $T_L = 0.01$ н;
 - реакция среды, $k = 10$ н/м².
- длина иглы $L = 78.5$ мм, что соответствует 1/8 окружности: $0 \leq \varphi \leq \pi/4$; удалось установить, что перерезывающая сила и изгибающий момент обращаются на острие в ноль. Такие граничные условия обеспечивают минимальное травматическое воздействие на ткани, а значит, повышают безопасность самой процедуры.

4 Разработка алгоритмов функционирования макета роботизированной системы по введению радионуклидных микроисточников в тело пациента по линейной и криволинейной траекториям

Данный раздел предусматривает описание алгоритмов функционирования макета, функций отдельных узлов системы и порядка их применения. Макет роботизированной системы предназначен для отработки перспективных методов введения радионуклидных микроисточников в опухолевую область при операциях брахитерапии.

Макет обеспечивает отработку новых методик и алгоритмов введения микроисточников, оценку точности позиционирования при их введении, отработку технических средств роботизированного комплекса и устройств их сопряжения, разработку и проверку алгоритмов и программного обеспечения для контроля и управления в процессе операции. Состав макета и взаимодействие его компонентов поясняется в разделе 4.1.

4.1 Состав макета роботизированной системы

Перечислим основные требования технического задания, являющиеся определяющими при разработке алгоритмов функционирования макета.

Состав макета роботизированной системы определён техническим заданием и состоит из:

- манипулятора, предназначенного для наведения хирургического инструмента;
- устройства перемещения игл, предназначенного для введения игл в тело пациента по заданной траектории;
- очерствлённого привода для измерения прилагаемых усилий к инструменту;
- системы управления для обеспечения выдачи управляющих команд на приводы манипулятора и устройства перемещения игл и контроля исполнения команд.

Также, согласно требованиям технического задания разрабатываемый макет роботизированной системы должен обладать следующими функциональными характеристиками:

- обеспечивать плавный подвод и нацеливание инструмента на область оперирования;
- обеспечивать поступательно-вращательное движение игл при использовании вращения для управления движением игл по криволинейной траектории;
- контролировать усилие, прилагаемое к инструменту.

Разрабатываемый макет роботизированной системы должен обладать следующими характеристиками:

- погрешность позиционирования хирургического инструмента в этой зоне не более 0,5 мм;
- скорость перемещения инструмента не более 30 мм/с;
- число степеней подвижности не менее 6;
- номинальную грузоподъемность манипулятора в динамическом режиме – не менее 1 кг;
- порог чувствительности к усилию, приложенному в любом направлении по отношению к оси инструмента, не менее 0,1 Н;
- протокол обмена данными с системой управления макета роботизированной системы должен обеспечиваться в режиме реального времени.
- управление манипулятором должно осуществляться в автоматическом и полуавтоматическом режимах работы.

4.2 Разработка алгоритмов функционирования макета роботизированной системы

Проведём описательную часть по каждому узлу макета с целью описать предназначение каждого устройства и сформировать круг решаемых задач. Для этого рассмотрим общую схему макета роботизированной системы, изображённую на рисунке 4.1

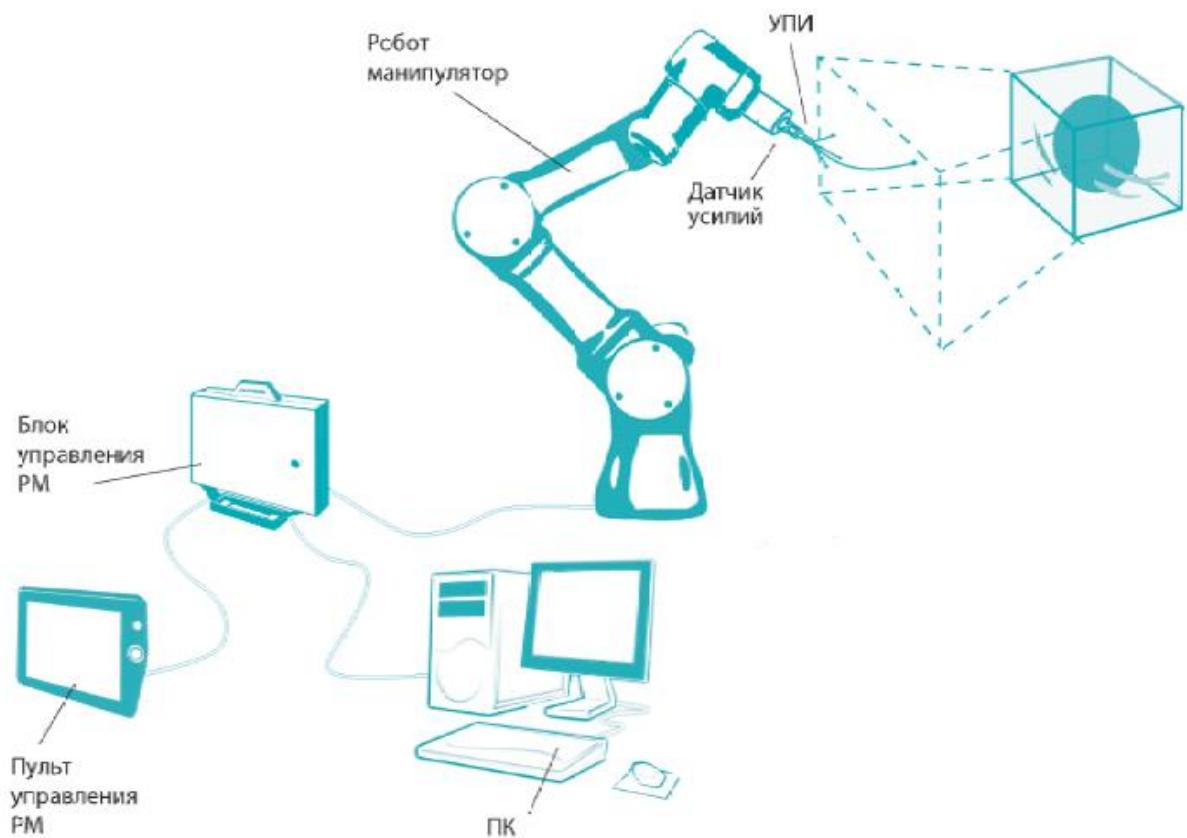


Рисунок 4.1 – Состав макета роботизированной системы

Робот-манипулятор обеспечивает управляемое пространственное перемещение в рабочем пространстве. На рабочем органе роботоманипулятора крепится устройство перемещения игл в составе:

- иглы для формирования канала доступа микроисточников;
- датчика усилий в точке крепления иглы;

Пользовательский компьютер осуществляет управление роботом-манипулятором и устройством перемещения игл и получается информацию по обратной связи с датчиков усилия. Так как алгоритм функционирования должен содержать в себе два режима работы макета: автоматический и полуавтоматический, целесообразно иметь устройство для ручного управления роботом-манипулятором и устройством перемещения игл. Таким устройством может быть джойстик (на схеме пульт управления РМ).

Для обеспечения заданных требований технического задания

Основываясь на материалах предыдущих глав, становится очевидным тот факт, что второй по важности частью роботизированной системы для

брехитерапии после непосредственно робота – манипулятора с устройством ввода игл является система сканирования, визуализирующая состояние тканей пациента, положение иглы и микроисточников. Современные роботизированные системы обладают способностью точно позиционировать иглу в теле пациента только в том случае, если у робота есть возможность точно знать текущее положение инструмента, пациента и целевой области. Это свойство систем называется стереотаксическим.

Одним из возможных перспективных вариантов систем сканирования, применяемых на сегодняшний день, являются МРТ системы. К сожалению, принцип действия МРТ сканера накладывает на роботизированную систему существенные ограничения, на которых хотелось бы остановиться подробнее.

Структура алгоритма управления макетом

Рассмотри структуру алгоритма управления макетом, представленную на рисунке 4.2. Приведена схема взаимодействия функциональных подсистем программы. Сплошными стрелками показаны потоки данных, пунктирными – интерактивное использование пользовательского интерфейса визуализации.

Базовой концепцией программной архитектуры является использование топологических моделей физических и логических объектов макета и непрерывный мониторинг с применением этих моделей фактических координат подвижных элементов макета в ходе эксперимента. С этой целью в программе реализована иерархическая модель невизуальных классов для моделей объектов и интерфейсы для их 3D визуализации с использованием API WPF

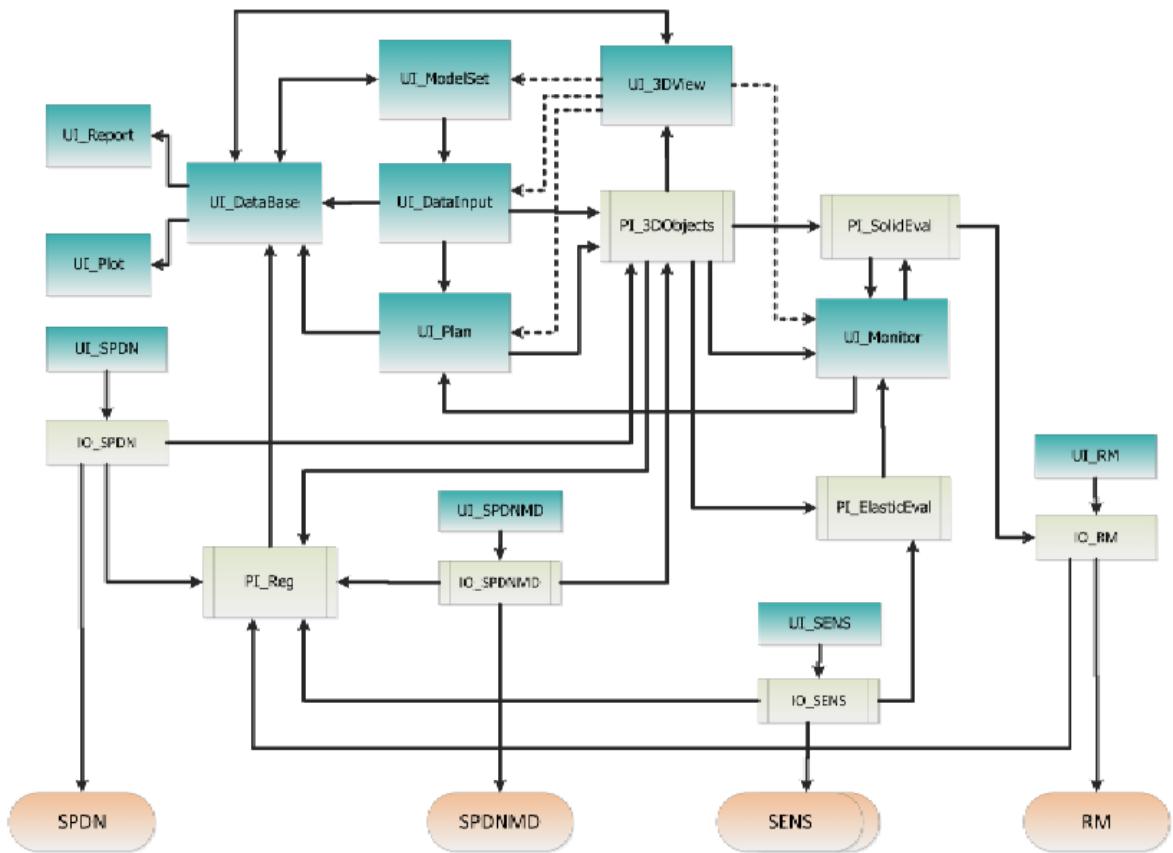


Рисунок 4.2 – Функциональная схема взаимодействия подсистем макета роботизированной системы

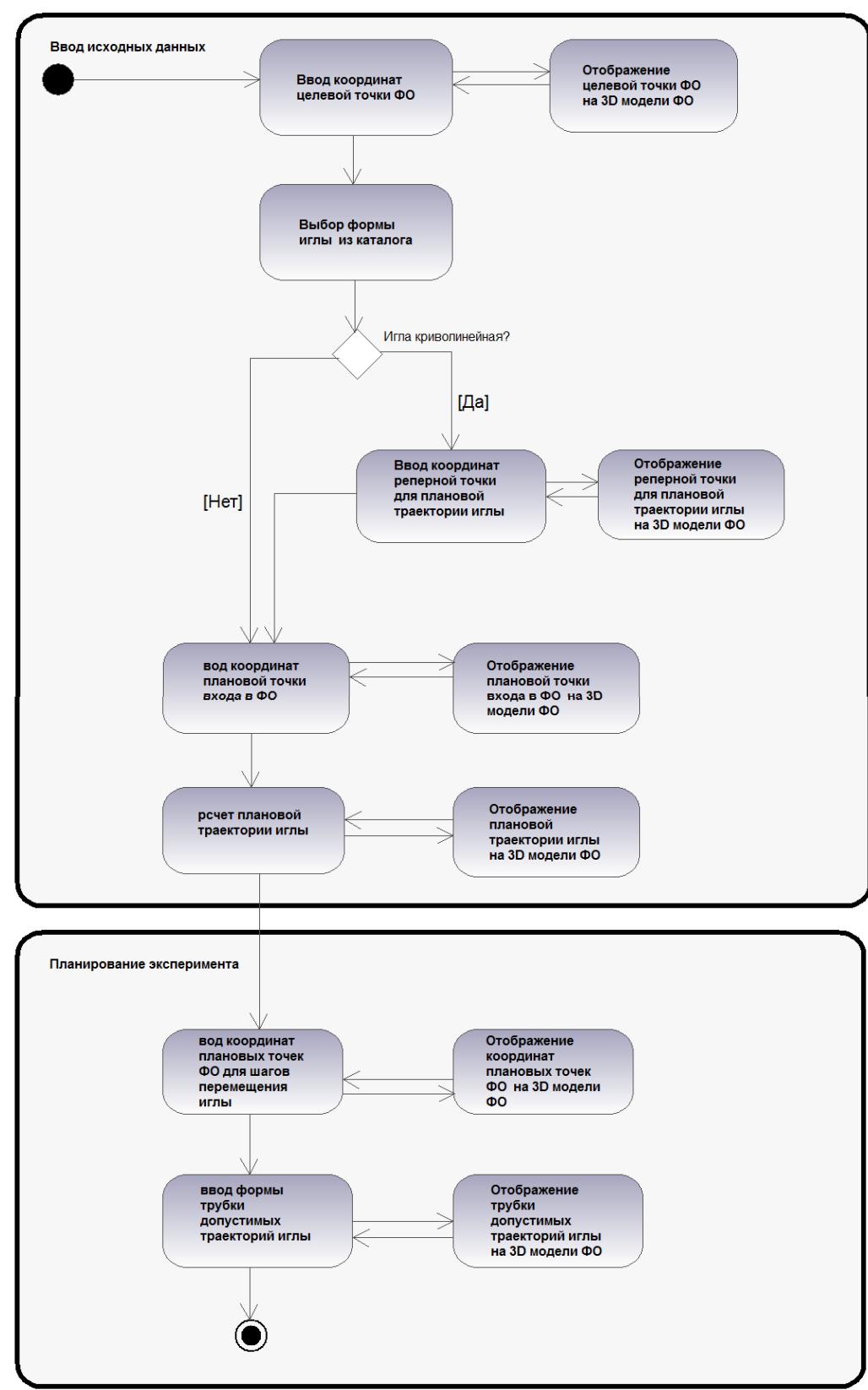
Алгоритмы ввода исходных данных.

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены блок-схемы реализованных в программе альтернативных способов формирования исходных данных для эксперимента. Первый способ (рисунок 4.3) будет применяться на начальной стадии экспериментальной отработки проникновения в ФО криволинейных игл.

В этом случае в ФО назначается целевая точка и экспериментатор сам выбирает интересующую его иглу, плановую точку входа в ФО и примерный ход плановой траектории проникновения (которая затем автоматически рассчитывается программой). Второй способ (рисунок 4.4) моделирует алгоритм минимизации количества проколов при проведении операции. Экспериментатор произвольным образом задает в теле ФО реперные точки и допустимые отклонения от них (шаровые окрестности). Реперные точки служат моделью плана размещения микроисточников в теле опухоли.

Затем, по реализованному в программе расчетному алгоритму ищется форма иглы и плановая траектория иглы, обеспечивающая прохождение через окрестности наибольшего числа реперных точек. При этом перебираются все иглы, описания которых размещены в файле контекста инструментов NEEDLES.xml. Точка ФО, соответствующая концу иглы на ее оптимальной траектории становится целевой точкой ФО.

В обоих случаях, подготовка к эксперименту заканчивается интерактивным планированием (с применением 3D визуализации) количества рассчитываемых программой и контролируемых в ходе эксперимента шагов перемещения иглы и заданием трубы допустимых траекторий иглы, выход за которую после очередного шага будет являться основанием для прекращения эксперимента.



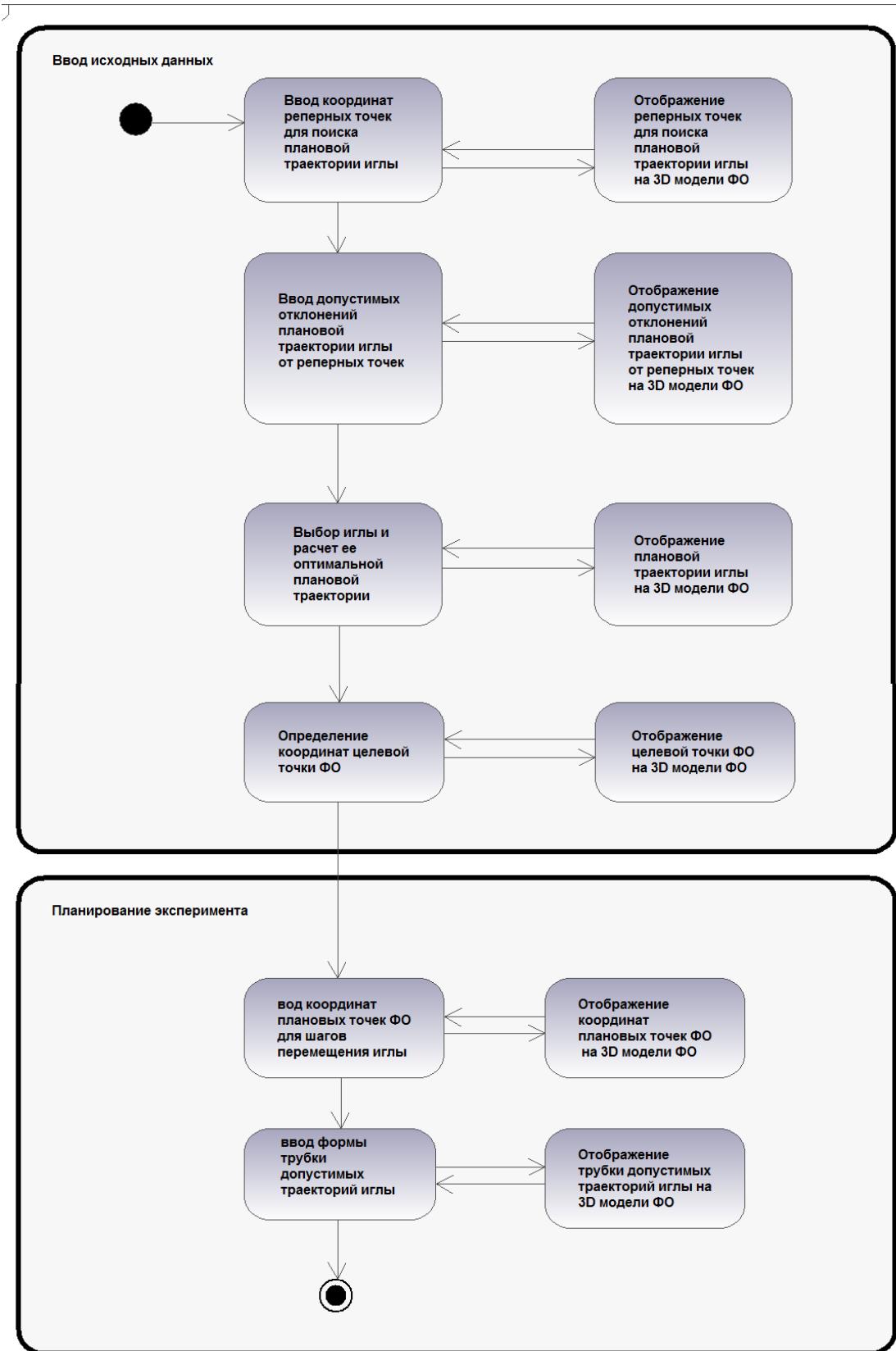


Рисунок 4.4 – Блок схема алгоритма минимизации количества проколов при проведении операции

Алгоритмы перемещения иглы к входной точке

После ввода исходных данных, расчета плановой траектории иглы и определения плановой точки входа иглы в ФО, необходимо доставить иглу в точку входа, разместив и сориентировав УПИ в пространстве таким образом, чтобы в дальнейшем обеспечить движение иглы к целевой точке по плановой траектории. Плановые начальные линейные и угловые координаты УПИ рассчитываются программой автоматически. При этом, начальное положение УПИ в ЗКП УПИ может быть произвольным.

На рисунке 4.5 представлена схема потоков данных в алгоритме перемещения иглы к плановой входной точке ФО. Используя плановые начальные координаты УПИ, в которых его необходимо разместить перед внедрением иглы в ФО, и известные (определенные УКП УПИ) координаты обнаружения УПИ, можно определить необходимые приращения линейных и угловых координат УПИ. Теоретически такое перемещение можно осуществить в рамках одного целеуказания для РМ. Однако, учитывая инерционность приводных механизмов и недостаточную паспортную точность позиционирования рабочего органа РМ, целесообразно выполнять такое перемещение по шагам, используя итерационную процедуру. Экспериментатор задает количество шагов приближения, а программа автоматически рассчитывает оптимальные положения этих точек в ЗКП УПИ и требуемые линейные и угловые координаты УПИ в каждой точке. План перемещения можно посмотреть по шагам на 3D модели.

Программа, по команде экспериментатора рассчитывает приращения координат УПИ для первого шага. Прогноз положения УПИ и иглы можно просмотреть на 3D модели. Затем, по команде оператора инициируется процесс передачи команд РМ, включается регистрация процесса перемещения в УКП УПИ и РМ производит перемещение в требуемую точку.

Новое положение УПИ и иглы отображается на 3D модели. Фактические угловые и линейные координаты УПИ сравниваются с

плановыми. Дальнейший план перемещения автоматически корректируется программой с учетом допущенной на реализованном шаге ошибки позиционирования.

После последнего шага программой оценивается точность позиционирования иглы и точность достижения плановых начальных координат УПИ. Если фактическая точка входа проецируется на допустимое сечение входа и находится непосредственно у входной плоскости ФО, то можно начинать вторую часть эксперимента - внедрение иглы в ФО и ее движение к целевой точке ФО по плановой траектории.

Алгоритм перемещения иглы к целевой точке ФО

На рисунке 4.6 представлена схема потоков данных при реализации пошагового алгоритма перемещения иглы в ФО по заданной плановой траектории с точностью позиционирования, обеспечивающей нахождение иглы в трубке допустимых траекторий. Плановая траектория, целевая точка ФО, плановые точки ФО (точки, в которых должна находиться игла после каждого шага), трубка допустимых траекторий - были определены ранее, на стадии подготовки исходных данных.

Перед очередным (и перед первым) шагом перемещения, по измерительным данным УКПИ определяется фактическое положение конца иглы, по данным УКП УПИ - фактические линейные и угловые координаты УПИ, по данным датчиков - усилия и моменты в месте крепления иглы. Зная координаты следующей плановой точки ФО, по этим исходным данным, используя расчетный алгоритм на базе теории упругости, производится прогнозный расчет перемещения иглы к плановой точке. Рассчитываются необходимые для этого линейные и угловые перемещения УПИ.

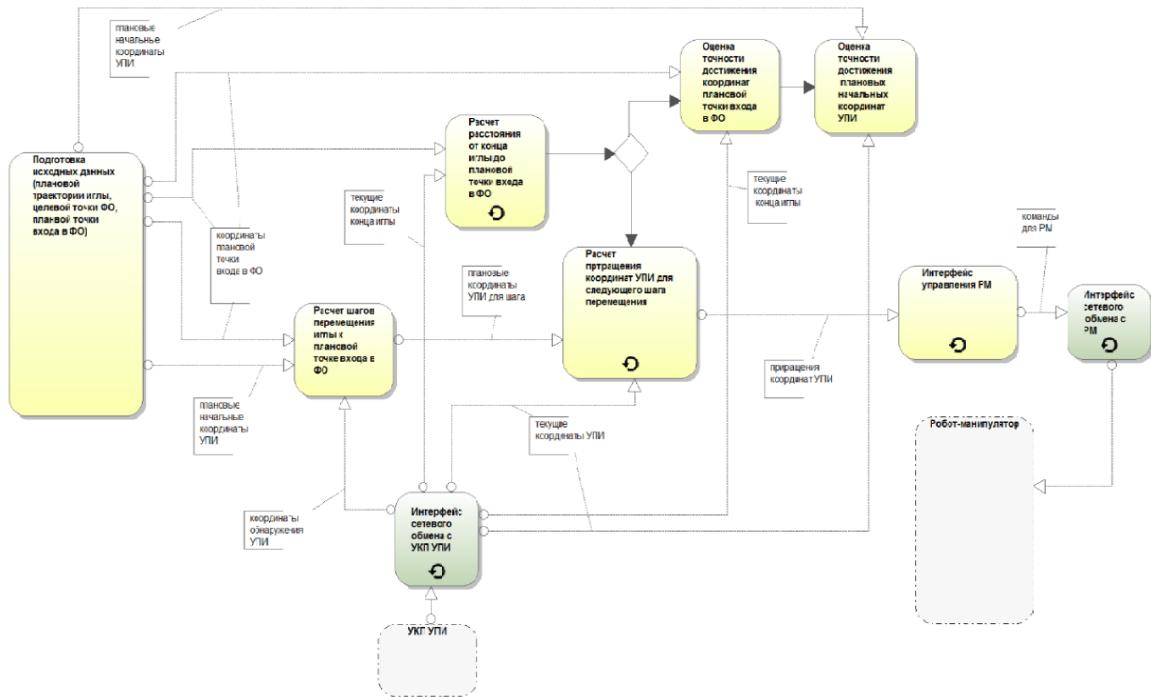


Рисунок 4.5 – Блок схема потоков данных в алгоритме перемещения иглы к плановой входной точке ФО

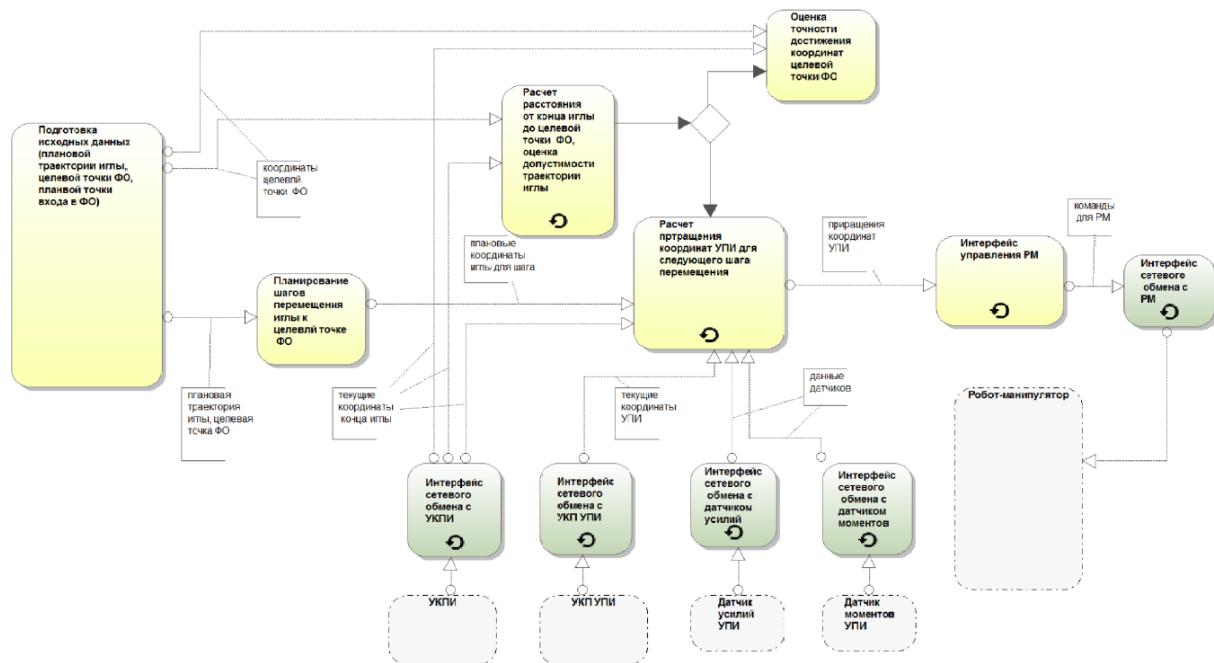


Рисунок 4.6 – Блок схема потоков данных при реализации пошагового алгоритма перемещения иглы в ФО по заданной плановой траектории с точностью позиционирования

По команде оператора производится выдача команд РМ, РМ осуществляет перемещение УПИ в ЗКП УПИ и перемещение иглы в ФО к следующей плановой точке. Параллельно, с заданным шагом по времени производится регистрация координат перемещающихся объектов и показания датчиков.

По завершении шага с использованием зарегистрированных данных оценивается допустимость фактической траектории иглы на шаге. Если траектория вышла за трубку допустимых траекторий, эксперимент прекращается и производится заново с новым планом. После последнего шага, при достижении иглой целевой точки оценивается погрешность приближения.

Разработанные алгоритмы управления макетом роботизированной системы по введению радионуклидных микроисточников в область фантома опухоли охватывают весь спектр рассмотренных при математическом моделировании вопросов.

5 Разработка программного обеспечения управления макетом роботизированной системы

Приведём перечень основных требований к программному обеспечению управления макетом описанных в техническом задании.

Разрабатываемое ПО должно осуществлять оперативный сбор данных, их обработку в режиме реального времени, визуализацию на экране ПК, необходимое взаимодействие с оператором, выработку команд управления частей макета роботизированной системы.

В состав ПО разрабатываемого макета роботизированной системы должно входить:

- Системное ПО (далее – СПО) в составе:
 - программная платформа Microsoft .NET Framework последних версий;
 - графическая библиотека Open Graphics Library (OpenGL) последних версий;
- Прикладное ПО (далее – ППО) в составе:
 - программа управления макетом роботизированной системы для ПК;
 - программа управления манипулятором для микроконтроллера;
 - программа управления устройством перемещения игл для микроконтроллера.

ППО разрабатываемого макета роботизированной системы должно обеспечивать:

- управление движением манипулятора и устройством перемещения игл;
- отображение информации о параметрах макета роботизированной системы в процессе выполнения манипуляций на мониторе ПК;
- выполнение функциональных задач макета роботизированной системы;
- контроль усилий на игле и автоматическую остановку движения при превышении заданных пороговых значений.

Языком интерфейса пользователя ППО должен быть русский. ППО должно устойчиво функционировать и обеспечивать работоспособность в следующих ситуациях:

- ошибки во входных данных;
- некритические сбои и отказы технических и программных средств разрабатываемого макета роботизированной системы.

Отталкиваясь от приведённых требований было разработано программное обеспечение управления макетом роботизированной системы. В ходе разработки были проведены:

- 1 анализ требований ТЗ, их функциональная декомпозиция и преобразование в функциональные требования к ПО;
- 2 разработка терминологии предметной области, информационной и математической модели предметной области;
- 3 разработка архитектуры ПО макета, выделение аппаратно-независимая части ПО, выполняемой на ПК макета;
- 4 разработка прикладных программных интерфейсов для информационного обмена с ПО технических средств макета, не зависящих от их конкретной аппаратной реализации;
- 5 исследования по выбору инструментальных средств разработки и языков программирования;
- 6 исследования по выбору прикладного программного интерфейса математических расчетов;
- 7 исследования по выбору СУБД для реализации БД проведенных на макете экспериментов и инструментальных программных средств генерации отчетов;
- 8 разработка кода программы управления макетом;
- 9 отладка и тестирование кода программы управления макетом с применением тестовых эмуляторов потока данных, поступающих с технических средств макета;
- 10 выпуск программной документации.

5.1 Выбор программной среды

С учетом требований ТЗ программу управлению макетом было решено реализовывать в операционной системе Windows, в качестве основного инструментального средства для разработки была выбрана программная среда Visual Studio Professional 2013 фирмы Microsoft, среда выполнения управляемого кода - .NET Framework 4.5, основной язык программирования пользовательских и прикладных программных интерфейсов - C#, основной язык реализации неуправляемого кода в программных интерфейсах взаимодействия с техническими средствами – C++.

5.2 Выбор программного интерфейса математических расчетов

Выбор программного интерфейса математических расчетов проводился по следующим критериям:

- наличие необходимых для программы управления макетом расчетных методов и алгоритмов;
- возможность вызова функций из управляемого кода .NET;
- удобство программного интерфейса, объектно-ориентированная парадигма;
- быстродействие реализованных алгоритмов, возможность параллельных вычислений;
- наличие документации и тестовых примеров.

Были выбраны для сравнения, изучены и частично протестированы следующие библиотеки:

- Math.NET Numerics;
- NMath.NET 6.1;
- Extreme Optimization Numerical Libraries for .NET 5.0;
- IMSL C# Numerical Library 5.0;
- реализация математических расчетов в среде MATLAB и интерфейсов вызова функций MATLAB из управляемого кода программы.

Анализ показал, что все приведенные библиотеки могут быть использованы для реализации расчетных алгоритмов управления макетом. По скорости разработки лидирует вариант с использованием вызова функций MATLAB. По совокупности всех критериев целесообразно использовать библиотеку Extreme Optimization Numerical Libraries for.NET 5.0 при наличии возможности покупки лицензии.

5.3 Анализ и выбор баз данных

Для накопления и эффективного доступа к результатам экспериментов на макете и ретроспективного анализа хода экспериментов целесообразно автоматически размещать экспериментальные данные в БД.

Сравнительный анализ вариантов показал, что для макета оптимальным будет использование локальной СУБД Access и БД соответствующего формата. Драйверная поддержка СУБД Access непосредственно обеспечивается операционной системой Windows, поэтому покупать лицензию на Access не требуется.

Для генерации документов и, в частности, автоматического создания документированной версии журнала испытаний было предложено использовать компактный генератор отчетов Fast Report.Net 4.0, обладающей достаточной функциональностью, недорогой лицензией и интегрируемый в Visual Studio.

5.4 Описание программы управления макетом роботизированной системы

В соответствии с техническим заданием, программная документация выполнена по требованиям ЕСПД. В настоящий момент созданы программные документы «Описание программы» [ПРИЛОЖЕНИЕ А], «Описание применения» [ПРИЛОЖЕНИЕ Б], «Руководство системного программиста» [ПРИЛОЖЕНИЕ В] и «Руководство оператора» [ПРИЛОЖЕНИЕ Г], «Текст программы» [ПРИЛОЖЕНИЕ Д].

Документ «Описание программы» содержит сведения о функциональном назначении программы управления макетом, описание ее логической структуры, требования к техническим средствам, необходимым для работы программы, описание входных и выходных данных, а также, необходимые для понимания терминологии сведения по предметной области и техническим средствам макета.

Данный документ предназначен для программистов, выполняющих доработку ПО макета, и инженеров, ведущих разработку макета, приобретение и сопряжение его технических средств.

Документ «Текст программы» содержит каркасный код программы управления макетом и предназначен для предварительного ознакомления программистами, собирающимися развивать данную тематику.

Настоящий документ предназначен для описания архитектуры, организации данных, функций, требований и порядка применения «Программы управления макетом роботизированной системы по внедрению радионуклидных микроисточников» (далее - программа). Макет роботизированной системы (далее - макет) предназначен для отработки перспективных методов введения радионуклидных микроисточников в опухолевую область при операциях брахитерапии.

Описание и терминология предметной области

Программа должна эксплуатироваться вместе с комплексом технических средств, предназначенных для макетирования роботизированной системы. Макет обеспечивает отработку новых методик и алгоритмов введения микроисточников, оценку точности позиционирования при их введении, отработку технических средств роботизированного комплекса и устройств их сопряжения, разработку и проверку алгоритмов и программного обеспечения для контроля и управления в процессе операции, плавный подвод и нацеливание инструмента на область оперирования, поступательно-вращательное движение игл при использовании вращения для управления движением игл по криволинейной траектории.

Пространственное положение устройства перемещения игла перед входной плоскостью фантома опухоли (три линейных и три угловых координаты) с заданной точностью определяется устройством контроля положения устройства перемещения игл с использованием реперной системы. Область чувствительности устройства контроля положения устройства перемещения игл образует зону контроля положения. Устройство контроля определяет, также, пространственные координаты конца иглы до ее контакта с входной плоскостью фантома опухоли. Пространственное положение конца иглы внутри фантома опухоли при движении к целевой точке фантома (три координаты) и фактическую траекторию иглы определяет устройство контроля положения иглы в области чувствительности которого находится фантом, выполненный из прозрачного геля. Процесс детализировано представлен на рисунке 5.1

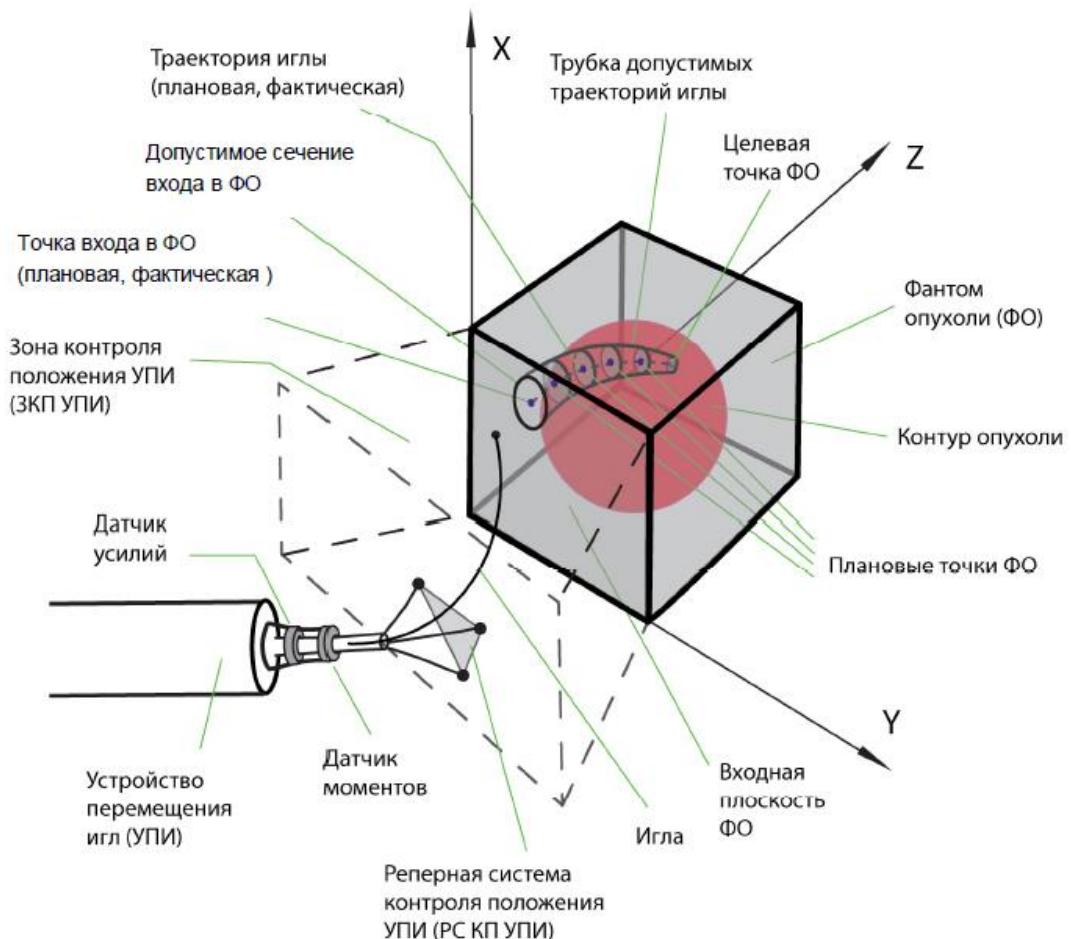


Рисунок 5.1 – Процесс входа иглы в фантом опухоли

ПК макета с установленной программой обеспечивает управление робота-манипулятором по протоколу TCP/IP, регистрацию, архивирование и экспорт экспериментальных данных, ретроспективный анализ хода эксперимента.

Типовая схема проведения эксперимента по макетированию введения игл в операции брахитерапии состоит из следующих шагов:

- сборка УПИ;
- установка ФО;
- монтаж УПИ на рабочем органе РМ;
- калибровка УКП УПИ и УКПИ;
- запуск программы;
- позиционирование УПИ в ЗКП УПИ (вручную или с использованием пульта управления РМ);
- формирование данных: координат целевой точки фантома, плановой траектории иглы, трубы допустимых траекторий иглы, плановых точек фантома, плановой точки входа в фантом, плановых начальных координат устройства перемещения игл;
- выполнение пошаговой интерактивной процедуры перемещения конца иглы к расчетной точке входа в фантом опухоли; каждый шаг включает в себя:

- расчет или ручной ввод новых координат устройства перемещения и конца иглы (прогноза нового положения);
- формирование последовательности команд для робота;
- включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков и устройства контроля положения и устройства перемещения игл;
- выдачу последовательности команд для робота, автоматическое перемещение устройства перемещения игл;
- автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков и устройства контроля и устройства перемещения;

- оценку точности прогноза положения;
- после контакта конца иглы и входной плоскости ФО - сравнение координат расчетной и фактической точек входа в ФО, оценка допустимости положения иглы для движения к целевой точке ФО;
- выполнение пошаговой интерактивной процедуры перемещения конца иглы к целевой точке ФО; каждый шаг включает в себя:
 - опрос датчиков усилий;
 - расчет новых координат устройства перемещения, обеспечивающих перемещение конца иглы к очередной плановой или к целевой точке фантома;
 - формирование последовательности команд для робота;
 - включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков, устройств контроля и перемещения;
 - выдачу последовательности команд для робота-манипулятора, автоматическое перемещение устройства перемещения игл;
 - автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков, устройств контроля и перемещения;
 - оценку точности прогноза положения, контроль допустимости траектории иглы (невыход фактической траектории иглы из трубки допустимых траекторий);
 - при достижении концом иглы целевой точки фантома - оценка точности позиционирования иглы;
 - выполнение пошаговой интерактивной процедуры извлечения иглы, каждый шаг включает в себя:
 - формирование последовательности команд для робота-манипулятора в порядке, обратном соответствующему шагу внедрения иглы;
 - включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков, устройств контроля и перемещения;
 - выдачу последовательности команд для робота, автоматическое перемещение устройства перемещения игл;

- автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков, устройств перемещения и контроля;
- контроль допустимости траектории иглы (невыход фактической траектории иглы из трубы допустимых траекторий).
- сохранение данных эксперимента в базах данных с использованием интерфейсов программы (описания эксперимента, исходные данные, расчетные и фактические траектории движения устройства перемещения иглы и конца иглы, показания датчиков);
- документирование эксперимента, экспорт данных эксперимента с использованием интерфейсов программы.

Критериями достижения положительного результата при макетировании является достижение для фантома опухоли различной плотности:

- максимально возможной точности позиционирования иглы в целевой точке фантома опухоли;
- возможности движения игл по криволинейным трубкам допустимых траекторий;
- максимального сужения трубок допустимых траекторий;
- минимизации количества шагов при движении иглы к расчетной точке входа в фантом и к целевой точке фантома.

Общие сведения о программе

Наименование программы - "Программа управления макетом роботизированной системы". Сокращенное наименование программы "ShmeManager".

Программа эксплуатируется на ПК, входящем в состав макета, на котором должны быть установлены:

- операционная система "Windows 7x32 Service Pack 3";
- среда выполнения ".NET Framework 4.5";
- СУБД Microsoft Jet Database Engine 4.0 или выше;
- генератор отчетов Fast Report.Net 4.0.

Кроме этого, на ПК макета желательна установка: СУБД MS Access 2010 и среды математических вычислений MATLAB 2015a.

Программа написана на языках программирования C# (с использованием технологии WPF) и C++. В состав программы входят служебные файлы на языках разметки: XAML, XSD, XML.

Результаты экспериментальных исследований, полученные с использованием программы сохраняются в базе данных формата MS Access. С помощью генератора отчетов Fast Report.Net из данных базы данных экспериментов программой может быть автоматически сгенерирован Журнал испытаний в формате pdf или doc.

Программа предназначена для предоставления пользовательских и программных интерфейсов, обеспечивающих использование макета для проведения экспериментальных научных исследований и разработки технических, алгоритмических и программных решений, направленных на создание прототипа роботизированной системы для проведения операций брахитерапии.

Программа решает задачи:

- формирования формальных описаний игл и фантомов опухоли (файлов контекста инструментов);
- подготовки исходных данных для экспериментов на макете и планирование эксперимента;
- управления роботом-манипулятором в процессе экспериментов;
- управления устройствами контроля и перемещения игл и получения от них по запросу результатов измерения линейных и угловых координат устройства перемещения и линейных координат конца иглы в зоне контроля положения устройства перемещения;
- управления устройством контроля положения иглы и получения от него результатов измерения линейных координат конца иглы в фантоме;
- получения результатов измерения усилий и моментов в месте крепления иглы от датчиков, установленных на устройстве перемещения;

- регистрации всех получаемых программой измерительных данных и управление процессом регистрации;
- расчета требуемого приращения линейных и угловых координат устройства перемещения для следующего запланированного шага эксперимента при движении иглы в зоне контроля к плановой точке входа в фантом;
- расчета требуемого приращения линейных и угловых координат устройства перемещения для следующего запланированного шага эксперимента при движении иглы в фантоме опухоли к очередной плановой точке фантома или к целевой точке фантома;
- корректировки, в случае необходимости, плана эксперимента в ходе его проведения, перерасчета после следующего шага в ходе эксперимента количества шагов и координат плановых точек на плановой траектории иглы;
- сохранения результатов эксперимента в базе данных экспериментов;
- отбор данных из базы данных экспериментов;
- визуализация данных из баз данных экспериментов (текстовая, табличная, графическая);
- экспорт данных из базы данных экспериментов в общеупотребительные текстовые и графические форматы;
- генерацию файла журнала испытаний в одном из документирующих форматов.

Для решения указанных задач в программе реализованы пользовательские интерфейсы:

- ввода формальных описаний игл и фантомов опухоли для их сохранения в контекстах инструментов;
- ввода исходных данных, планирования и перепланирования эксперимента;
- подключения, управления, настройки параметров сетевого обмена и контроля состояния технических средств макета – робота-манипулятора, устройства контроля положения устройства перемещения игл, устройства контроля положения игл, датчиков усилия и момента;

- табличного представления, поиска, сортировки и отбора данных в базах данных экспериментов;
- представления данных из баз данных экспериментов в виде 2D и 3D графиков;
- генерации отчетов по данным баз данных экспериментов с предварительным просмотром результата;
- настройки параметров программы.

и программные интерфейсы:

- сетевого обмена данными с внешними устройствами: роботом, устройством контроля положения устройства перемещения игл, устройством контроля положения игл, датчиками усилия и момента;
- преобразования систем координат, пересчета координат объектов к другой системе;
- геометрического расчета координат после заданных перемещений и оценки взаимного положения совокупности объемных, плоских и точечных объектов в трехмерном пространстве;
- прогнозного расчета малых и конечных перемещений заделанного тонкого криволинейного упругого стержня частично размещенного в упругой анизотропной среде при малых и конечных линейных и угловых перемещениях заделки.

Состав программы

Файлы программы "ShmelManager" версии 1.0, предназначеннной для применения в составе макета размещаются в папке "ShmelManager", включающей в себя:

- папку ".\BIN", содержащую исполняемый файл "Shmel_MN.exe" и динамические библиотеки времени выполнения (файлы с расширением "dll");
- папку ".\DEVS", содержащую контексты внешних устройств макета: "RM.xml", "SPDNMD.xml", "SPDN.xml", "SENS.xml" - служебные файлы программы, предназначенные для настройки внешних устройств на применение в составе макета;

- папку ".\TOOLS", в которой размещены контексты инструментов макета: файл NEEDLES.xml, содержащий описания геометрических и механических параметров игл и файл PHANTOMS. xml, содержащий описания геометрических и механических параметров фантомов опухоли;
- папку ".\DB", содержащую файл EXPTemplate.mdb - шаблон БД для накопления данных экспериментов, использующийся при создании новых БД, и файл EXPReport.frx - шаблон для генерации программой Fast Report.net отчета об эксперименте (журнала испытаний);
- папку ".\SCHEMS", в которой размещены файлы с расширением xsd - спецификации для контекстов устройств и контекстов инструментов макета;
- папку ".\DOC", содержащую электронную версию программной документации в формате pdf.

Программа "ShmelManager" не использует явным образом реестр WINDOWS.

Предполагается, что при применении макета в папке DB программа размещает базу данных серий экспериментов. Остальные файлы программы остаются без изменений.

Установка и запуск программы

Программа устанавливается с помощью исполняемого дистрибутивного файла Shmel_MN_Setup.exe с использованием стандартного установочного диалога Windows.

Запуск программы из операционной среды Windows осуществляется любым принятым способом: из системного меню, из меню Windows «Пуск/Выполнить..», с использованием ярлыка на рабочем столе, из проводника Windows и пр.

Взаимодействие с другими программами

В процессе рабочего применения программа:

- производит обмен данными со встроенным ПО РМ по сетевому протоколу TCP/IP, с ПО устройств сопряжения УКП УПИ, УКПИ, датчиков усилий и моментов используя сетевой интерфейс USB 2.0;

- взаимодействует с системными коммуникационными драйверами;
- взаимодействует со средой выполнения управляемого кода CLR .NET Framework;
- взаимодействует с операционной средой WINDOWS;
- обменивается данными с СУБД Microsoft Jet Database Engine;
- вызывает генератор отчетов Fast Report.Net 4.0.

Контексты внешних устройств макета(XML файлы) обеспечивают настройку программных интерфейсов взаимодействия с устройствами без изменения кода исполняемого модуля. Эти файлы могут быть прочитаны и модифицированы любым XML редактором. Назначение настроек приведено в программной документации.

Используемые технические средства

Программа может эксплуатироваться на любом ПК, имеющем технические характеристики:

- процессор: Intel Core i3 или более производительный, частота 1.66 ГГц или выше;
- оперативная память: 4 ГБ или более;
- графический контроллер с видеопамятью не менее 256 МБ и поддержкой OpenGL;
- LCD дисплей: диагональ 19" или больше;
- жесткий диск емкостью не менее 500 ГБ;
- внешние интерфейсы: 5 x USB 2.0, Ethernet 100 Мб/с.

Сетевой интерфейс с РМ обеспечивается по кабелю Ethernet. Сетевой интерфейс с другими устройствами макета - подключением кабеля USB 2.0 к разъему ПК и соответствующего устройства сопряжения.

Данные программы

Входные данные - данные, использующиеся программой для выполнения своих функций, но созданные вне программы или программой ранее, но при выполнении других функций.

Выходные данные - данные, созданные или модифицированные программой, представляющие собой конечный результат или входные данные для других программ.

Служебные данные - данные постоянного хранения, входящие в состав программы, и предназначенные для ее настройки на применение. Применительно к одному эксперименту по проникновению иглы в фантом опухоли входными данными программы являются:

- контексты инструментов: файл NEEDLES.xml с формализованными описаниями имеющихся игл и файл PHANTOMS.xml с описаниями свойств фантомов опухоли;
- идентификатор выбранного для эксперимента фантома;
- координаты обнаружения устройства перемещения игл;
- координаты целевой точки фантома опухоли;
- координаты реперных точек для расчета плановой траектории иглы в фантоме опухоли;
- параметры трубки допустимых траекторий иглы (например функция ее диаметра от длины траектории);
- запланированное количество шагов при перемещении иглы к плановой точке входа в фантома;
- запланированное количество шагов при проникновении иглы от плановой точки входа фантома к целевой точке фантома и их распределение по траектории;

выходными данными программы являются:

- идентификатор выбранной программой иглы;
- плановая траектория иглы;
- трубка допустимых траекторий иглы;
- координаты плановой точки входа в фантом опухоли;
- допустимое сечение входа;
- координаты промежуточных плановых точек фантома;
- плановые начальные координаты Устройства перемещения игл;

- плановые значения приращения линейных и угловых координат устройства перемещения игл при движении иглы к плановой точке входа в фантоме на каждом шаге;
- фактические значения приращения линейных и угловых координат устройства перемещения игл при движении иглы к плановой точке входа в фантом на каждом шаге;
- координаты фактической точки входа в фантоме, оценка точности позиционирования;
- фактические начальные координаты устройства перемещения, погрешности позиционирования устройства перемещения перед проникновением иглы;
- расчетные значения приращения линейных и угловых координат устройства перемещения при движении иглы к промежуточной плановой точке фантома на следующем шаге;
- фактические значения приращения линейных и угловых координат устройства перемещения при движении иглы к промежуточной плановой или к целевой точке фантома на каждом шаге;
- траектория конца иглы в процессе перемещения;
- фактические значения координат конца иглы после шага, оценки погрешности позиционирования иглы относительно промежуточной плановой точки ФО или относительно целевой точки фантома;
- зарегистрированные в процессе движения иглы координаты устройства перемещения игл и координаты конца игл;
- данные регистрации усилий и моментов;
- численные представления вышеперечисленных объектов в базах данных сгенерированный отчет об эксперименте и экспортированные из программы файлы.

Применительно к функции заполнения файлов контекста инструментов

- входными данными являются текстовые описания игл и фантома и результаты инструментального измерения их параметров. Выходными

данными являются созданные или дополненные контексты инструментов и их визуальные представления в интерфейсе пользователя.

Применительно к частной задаче оценки точности позиционирования устройства перемещения игл с помощью робота-манипулятора в зоне контроля положения устройства перемещения входными данными являются:

- текущие координаты устройства перемещения игл (линейные и угловые);
 - заданные приращения координат устройства перемещения;
- выходными данными являются:
- расчетные значения новых координат устройства перемещения;
 - фактические значения новых координат устройства перемещения игл;
 - рассогласование между расчетными и фактическими значениями, статистические оценки погрешности позиционирования;

Применительно к задаче ретроспективного анализа эксперимента входными данными являются все плановые, расчетные на каждом шаге и фактические значения параметров движения устройства перемещения иглы и иглы.

В данном разделе проведена работа по разработке программного обеспечения управления макетом роботизированной системы. Описан общий алгоритм работы программы, функциональные назначения программы, её состав, процедура установки и запуска, взаимодействие с другими программами, применяемые технические средства при разработке программного обеспечения и данные необходимые для работы программы.

6 Разработка технических требований к компонентам макета роботизированной системы

Для анализа и выбора компонентной базы макета роботизированной системы необходимо разработать технические требования, представленные в техническом задании и полученные в результате проведённых исследований.

6.1 Характеристики и состав макета роботизированной системы

В техническом задании на этапе теоретических исследований и разработки математической модели необходимо определить технические требования к компонентам макета роботизированной системы. Макет роботизированной системы представлен на рисунке 6.1.

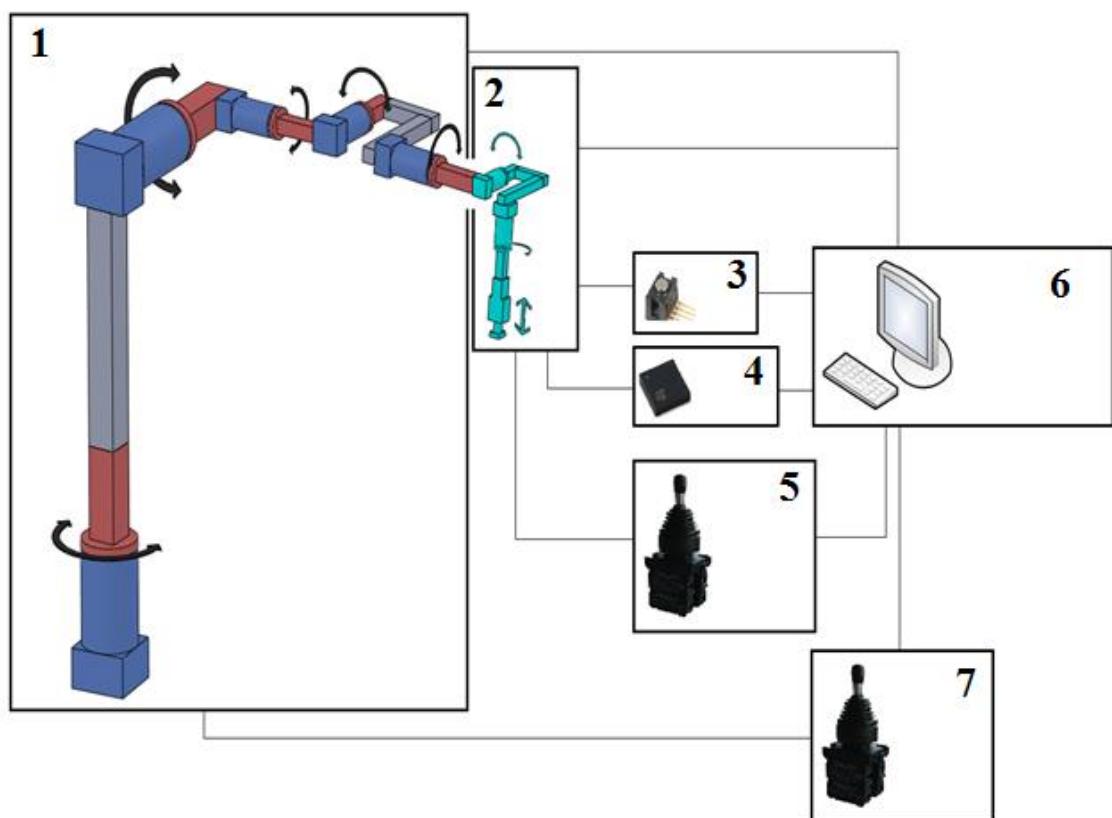


Рисунок 6.1 – Состав макета роботизированной системы, 1 – РМ, 2 – УПИ, 3 –датчик усилий, 4 – датчик положения, 5 – джойстик управления РМ, 7 – джойстик управления УПИ, 6 – ПК

Он должен состоять из следующих элементов:

- манипулятор для наведения хирургического инструмента;
- устройство перемещения игл, предназначенное для введения игл в тело пациента по заданной траектории;
- чувствительный привод для измерения прилагаемых усилий к инструменту;
- система управления для обеспечения выдачи управляющих команд на приводы манипулятора и устройства перемещения игл и контроля исполнения команд;

Согласно требованиям технического задания разрабатываемый макет роботизированной системы должен обладать следующими характеристиками:

- погрешность позиционирования хирургического инструмента в этой зоне не более 0,5 мм;
- скорость перемещения инструмента не более 30 мм/с;
- число степеней подвижности не менее 6;
- номинальную грузоподъемность манипулятора в динамическом режиме – не менее 1 кг;
- порог чувствительности к усилию, приложенному в любом направлении по отношению к оси инструмента, не менее 0,1 Н;
- протокол обмена данными с системой управления макета роботизированной системы должен обеспечиваться в режиме реального времени;
- управление манипулятором должно осуществляться в автоматическом и полуавтоматическом режимах работы;

В состав ПО разрабатываемого макета роботизированной системы должно входить:

- программа управления макетом роботизированной системы для ПК;
- программа управления манипулятором для микроконтроллера;
- программа управления устройством перемещения игл для микроконтроллера;

Прикладное ПО должно обеспечивать:

- управление движением манипулятора и устройством перемещения игл;

- отображение информации о параметрах макета роботизированной системы в процессе выполнения манипуляций на мониторе ПК;
- выполнение функциональных задач макета роботизированной системы;
- контроль усилий на игле и автоматическую остановку движения при превышении заданных пороговых значений;
- должно устойчиво функционировать и обеспечивать работоспособность при наличии ошибок во входных данных;
- должно устойчиво функционировать и обеспечивать работоспособность при наличии некритических сбоев и отказов технических и программных средств разрабатываемого макета роботизированной системы;

6.2 Разработка технических требований к роботу-манипулятору

Для реализации криволинейной траектории движения гибкой иглы и позиционирования устройства перемещения игл в заданной точке необходимо учитывать ряд важных требований к манипулятору.

Разработка технических требований к массогабаритным параметрам робот-манипулятора

Масса манипулятора не должна превышать 20 кг, поскольку в существующих опытных образцах, прототипах и серийных изделиях роботов-манипуляторов для проведения операций брахитерапии, нейрохирургии, биопсии и др. применяются различные подходы крепления робота для достижения оптимального взаимодействия между хирургом, пациентом, операционным столом и самим роботом-манипулятором, важно иметь сравнительно небольшие массогабаритные характеристики для снижения влияний при перемещении исполнительных звеньев манипулятора на возможное смещение стола, стойки, или помехи, которые могут создаваться для хирурга.

Рассмотрим различные варианты крепления робота. Так, в Agence Nationale de la Recherche [13] разработали опытный образец манипулятора, представленного на рисунке 6.2. Робот-манипулятор с семью степенями

подвижности для операций брахитерапии, закреплённый вместе с ультразвуковым сканером на отдельной стойке, специально разработанной под данный проект. Манипулятор в данном случае представляет собой систему приводов вертикального и горизонтального перемещения, имеющих вертикальные и горизонтальные металлические рельсы жёстко связанные с металлической рамой и вращения вокруг горизонтальной и вертикальной оси для проникновения в ткань человека под углом. Во время проведения операций на человеке стойка с роботом и сканером крепилась отдельно от операционного стола, как показано на рисунке 6.3.

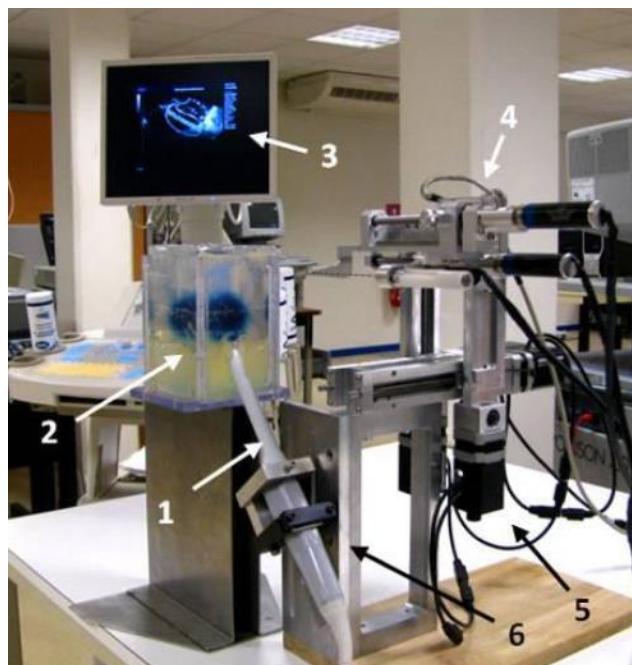


Рисунок 6.2 – Опытный образец робота-манипулятора TIMC-LIRMM Lab robot с 7 степенями подвижности для проведения операций брахитерапии, 1 – трансректальный УЗ сканер, 2 – фантом простаты, 3 – монитор УЗИ, 4 – устройство введения игл, 5 – устройство позиционирования игл, 6 – стойка крепления робота и сканера.

Это позволяет хирургу перед проведением операции позиционировать робот с учётом его рабочей зоны таким образом, чтобы оптимизировать расстояние до объекта, и тем самым сократить время прохождения иглой пустого пути, что сокращает общее время операции. К тому же, на

сегодняшний день операция брахитерапии проводится на операционном столе, который используется в гинекологии.



Рисунок 6.3 – Проведение операции брахитерапии с использованием робота-манипулятора TIMC-LIRMM Lab robot.

Крепление робота на таком столе с одного из краёв, или на конце стола приведёт к усложнению траектории движения робота по отношению к области инъекции и возможному попаданию простаты в зону недосягаемости робота. Использование отдельной стойки придаёт системе мобильность, что является достаточно важным параметром, т.к. площадь операционной не всегда позволяет разместить другие приборы и устройства, занимающие определённое место, что может привести к нехватке рабочего пространства. Стойка с манипулятором должна перемещаться свободно и без значительных усилий для персонала, в связи с чем, и сам манипулятор должен иметь сравнительно небольшие массогабаритные размеры. Однако, на данном этапе для макета роботизированной системы достаточно иметь жёсткую фиксацию манипулятора на неподвижной стойке, с оптимальным расположением всех компонентов макета, т.к. этого вполне достаточно для отработки траектории движения, решения задач инъекции и позиционирования устройства ввода игл и самих игл в фантоме простаты.

Так, например в The University of Wisconsin [14] разработали прототип робота для брахитерапии - UW robot. Система манипулятора и устройства доставки иглы представлена на рисунке 6.4. Устройство весьма компактное, малогабаритное и сравнительно небольшого веса в 5 кг.

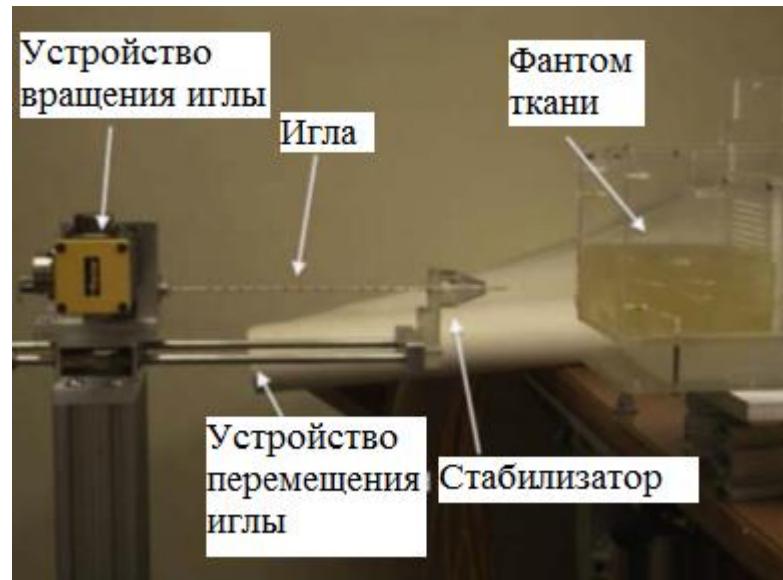


Рисунок 6.4 – Прототип робота брахитерапии UW robot.

Команда исследователей из Department of Radiation Oncology at Thomas Jefferson University [15] разработала роботизированную систему для операций брахитерапии – EUCLIDIAN, представленную на рисунке 6.5. Как можно видеть на изображении, система не интегрирована в операционный стол, а является отдельным элементом, подлежащим установке на передвижную платформу, как показано на рисунке 6.6.

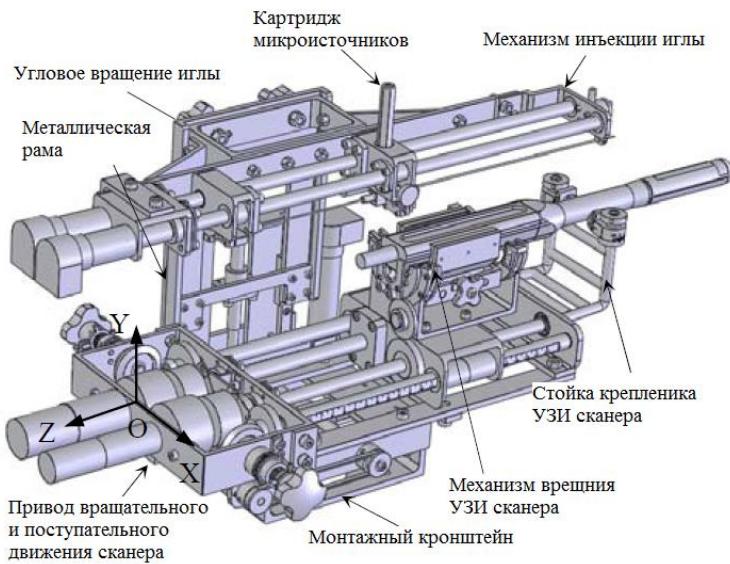


Рисунок 6.5 – Роботизированная система EUCLIDIAN.

Масса робота составляет 9,0 кг. С небольшими отличиями выглядит роботизированный комплекс NUCLETRON, представленный на рисунке 6.7 [16]. Он также разработан на базе передвижной платформы, но имеет

меньшие габариты и массу – 8 кг. Практически все рассмотренные роботизированные системы разработаны на основе принципа мобильности за счёт постановки манипулятора и сопряжённого с ним ультразвукового сканера на передвижную платформу. В то же время сами манипуляторы и устройства доставки микроисточников выглядят достаточно массивными и сложными в своём исполнении.

Рассмотрим ещё один пример робота-манипулятора для проведения хирургических операций на почке. Робот РАКУ [17], представленный на рисунке 6.8. Робот выполнен в виде манипулятора-руки, расположенный на специальной стойке, закреплённой на операционном столе.

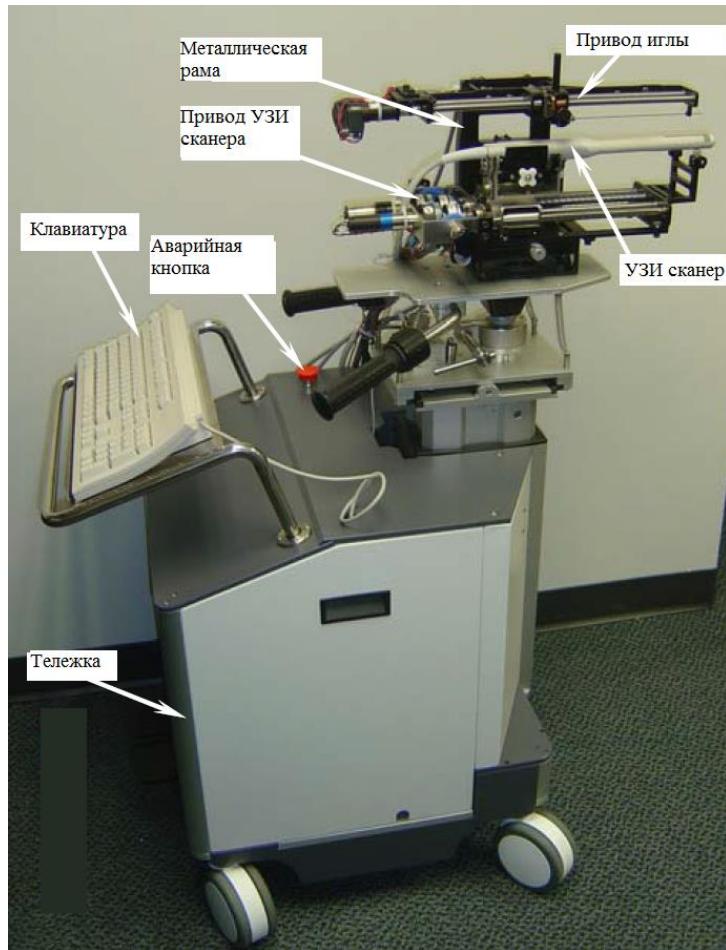


Рисунок 6.6 – Роботизированная система EUCLIDIAN на передвижной платформе.

Робот может перемещаться вдоль стола по горизонтальной рельсе, что позволяет расширить рабочую зону робота.



Рисунок 6.7 – Роботизированный комплекс NUCLETRON на передвижной платформе.

Стоит отметить, что такой подход компоновки хоть и является наиболее эргономичным, технологичным и системным, однако достаточно сложен в своей реализации и требует дополнительной разработки операционного стола и совместной интеграции стола и робота. Это является сложной задачей и не предусматривает в данной работе сопряжение операционного стола с роботом-манипулятором в таком виде.

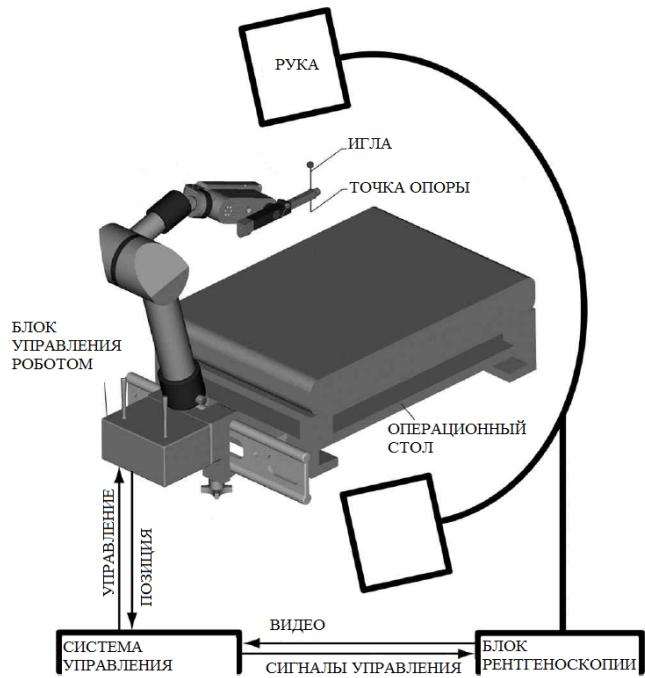


Рисунок 6.8 – Робот-манипулятор PAKY для хирургических операций на почке.

Подобную схему решения предлагают в Медицинском Центре Университета Утрехта [18]. Робот устанавливают непосредственно на операционный стол на определённом расстоянии от рабочей области, как показано на рисунке 6.9.

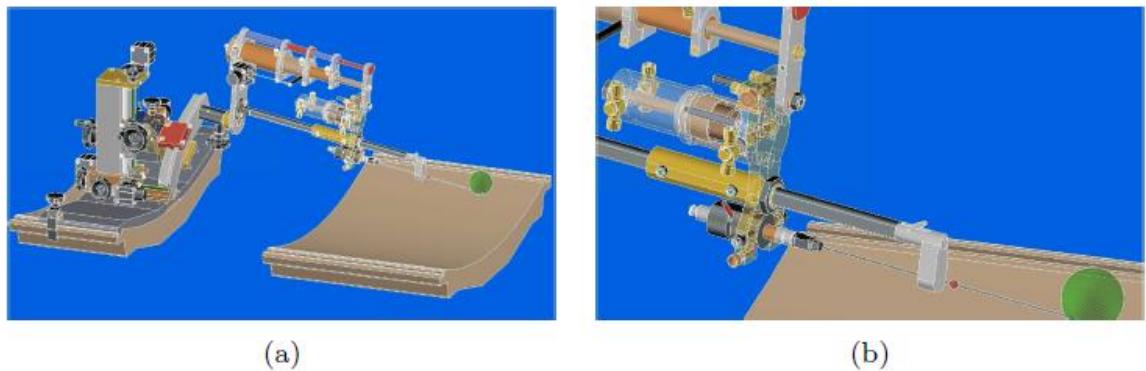


Рисунок 6.9 – Трёхмерная модель робота-манипулятора для операций брахитерапии с установкой на операционной стол.

Данное решение было предложено для сопряжения робота с устройством магнитно-резонансной томографии.

Таким образом, для обеспечения жёсткости, лёгкой сборки и установки макета роботизированной системы в рамках данного проекта на этапе теоретических исследований и разработки математической модели, масса манипулятора, как одного из компонентов макета не должна превышать 20 кг. Манипулятор при этом должен жёстко закрепляться на стойке, либо столе, либо мощной металлической штанге.

Таблица 4 Сравнительные характеристики роботов-манипуляторов для брахитерапии и др. операций

Робот	Масса робота, кг	Масса устройства доставки микроисточников, кг	Тип крепления
Euclidian	9,0	2,0	Мобильная платформа
Nucletron	8,0	3,0	Мобильная платформа
Paky	5,0	2,5	Крепление к операционному столу

UW robot	5,0	1,5	Мобильная платформа
TIMC-LIRMM Lab robot	7,2	3,9	Мобильная платформа
UBC robot	6,4	3,2	Мобильная платформа

Разработка технических требований к номинальной грузоподъёмности робота-манипулятора в динамическом режиме

Чтобы однозначно определить необходимую грузоподъёмность манипулятора в динамическом режиме нужно знать массу устройства ввода и доставки микроисточников в область опухоли. Возвращаясь к рассмотренным ранее опытным образцам роботов-манипуляторов, обратим внимание на исполнительный механизм. Практически в каждой разработке устройство доставки микроисточников с помощью игл – громоздкое и тяжёлое (см. таблицу 1). Их вес составляет в диапазоне от 2 до 4 кг. Поэтому требование к грузоподъёмности манипулятора должны учитываться с запасом в 3-4 кг и составлять не 1 кг, а 5 кг.

Так, например в работе [19] устройство для инъекции гибких игл для операции нейрохирургии, изображённое на рисунке 6.10, выглядит достаточно массивно и громоздко. Вес его составляет 4 кг.



Рисунок 6.10 – Исполнительное устройство для управления гибкой иглой для проведения операций нейрохирургии.

Разработка технических требований к числу степеней подвижности

Для обеспечения оптимальной рабочей зоны манипулятора, как показывают исследования представленных образцов роботизированных

систем, необходимо иметь как минимум 6 степеней свободы. Это позволит нам решить задачу подвода хирургического инструмента в нужную точку пространства, для дальнейшего осуществления перемещения уже устройством ввода. Некоторые из предложенных решений имеют 7 степеней свободы. Их количество зависит от сложности решаемых задач и закладываемых возможностей в робота. В нашей работе было предложено решение на базе робота-манипулятора по типу «рука» с шестью степенями подвижности, как показано на рисунке 6.11. При этом устройство перемещения хирургического инструмента должно иметь две степени подвижности: продольную и вращательную. Предложенный вариант имеет следующие преимущества:

- обеспечение множественности траекторий достижения заданной точки;
- применение одинаковых типов подвижек (вращательных), что упрощает проектирование системы;

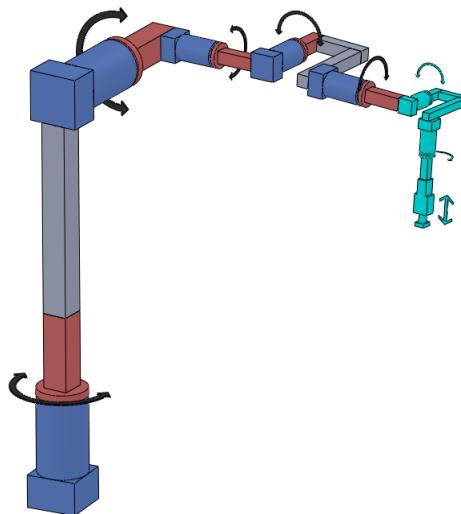


Рисунок 6.11 - Пример манипулятора типа «рука»
(голубым цветом обозначен рабочий орган, все остальные
компоненты системы относятся к манипулятору)

Разработка технических требований к точности позиционирования
устройства перемещения игл

Проведение операции брахитерапии с низкодозным облучением ставит перед нами задачу по достижению высокой точности позиционирования

инструмента, т.к. это напрямую влияет на точность закладки микроисточников в область опухоли согласно предварительному плану операции. Поэтому одним из основных требований к манипулятору является точность позиционирования схвата по отношению к зафиксированному основанию робота – базе не более 0,1 мм. Для этого, на устройстве перемещения игл необходимо предусмотреть многокоординатный датчик манипулятора, для обеспечения обратной связи по положению устройства. Сравним данные, полученные в результате многочисленных экспериментов, по точности позиционирования существующих роботов-манипуляторов для брахитерапии в таблице 5.

Таблица 5 Точность позиционирования инструмента роботов для брахитерапии

Точность/ Роботы	nucletron	Euclidia	Mirab	UMCU	UW robot	JHU- robot1	JHU2 MrBot	JHU3 MR	JHU & BWH- MR	UBC	RRI	CHUG	MIRA- V
Кончик иглы в воздухе, мм	Нет данных	<0,2	0,2	Нет данных	Нет данных	Нет данных	0,32	Нет данных	0,94	<0,3	0,2	Нет данных	<0,5
Кончик иглы в фантоме, мм	<0,5	<0,5	<0,5	Нет данных	Нет данных	1,04	<0,5	2,0	3,0	Нет данных	0,9	1,0	1,0
Расположен ие микроисточ ника, мм	<1 мм	<1 мм	<1 мм	Нет данных	<1 мм	Нет данных	<1 мм	Нет данных	Нет данных	1,2 мм	1,6 мм	Нет данных	Нет данных

Исходя из имеющихся данных по точности позиционирования кончика иглы в фантоме, половина роботов имеют точность не более 0,5мм. Это удовлетворяет требованию технического задания и подтверждает возможность реализации на практике обеспечения точности не более 0,5 мм. Необходимые требования для робота-манипулятора перечислены в таблице 6

Таблица 6 Список требований макета роботизированной системы к роботу-манипулятору

Робот-манипулятор	
Требования	Значения
Способ крепления	Фиксированное положение манипулятора на стойке, штанге
Масса манипулятора	<20,0 кг
Номинальная грузоподъёмность робота	<5,0 кг
Число степеней подвижности	6
Точность позиционирования схвата по отношению к зафиксированному основанию робота – базе	<0,1 мм
Протокол обмена данными	TCP/IP Ethernet, Modbus TCP, USB 2.0

6.3 Разработка технических требований к устройству перемещения игл

На этапе теоретических исследований и разработки математической модели для разработки устройства ввода игл, необходимо определить технические требования для проведения экспериментальных исследований. Скорость перемещения инструмента не более 30 мм/с.

Рассмотрим опыт зарубежных разработок роботов-манипуляторов для операций брахитерапии с точки зрения требований к скорости передвижения устройства ввода и доставки микроисточников. В работе [13] опытным путём было установлено, что продольное перемещение иглы должно происходить со скоростью 5 мм/с, это позволяет своевременно отслеживать иглу и её траекторию с помощью ультразвукового сканера, который используется в этой системе.

В работе [15] продольное перемещение игл осуществлялось на разных скоростях: 5 мм/с, 10 мм/с, 20 мм/с, 40 мм/с, 60 мм/с и 80 мм/с. Скорость стилета была в диапазоне от 20 мм/с до 60 мм/с. Количество внедряемых игл составляло 16 штук. Внедрение происходило с поэтапным увеличением количества игл в два раза. При этом для каждой скорости регистрировалось усилие инъекции. Экспериментальным путём было установлено, что при скорости продольного перемещения инструмента 40 мм/с для инъекции одной иглы усилие составило 15 Н и 16,5 Н при скорости 80 мм/с, что продемонстрировано на графиках на рисунке 6.12.

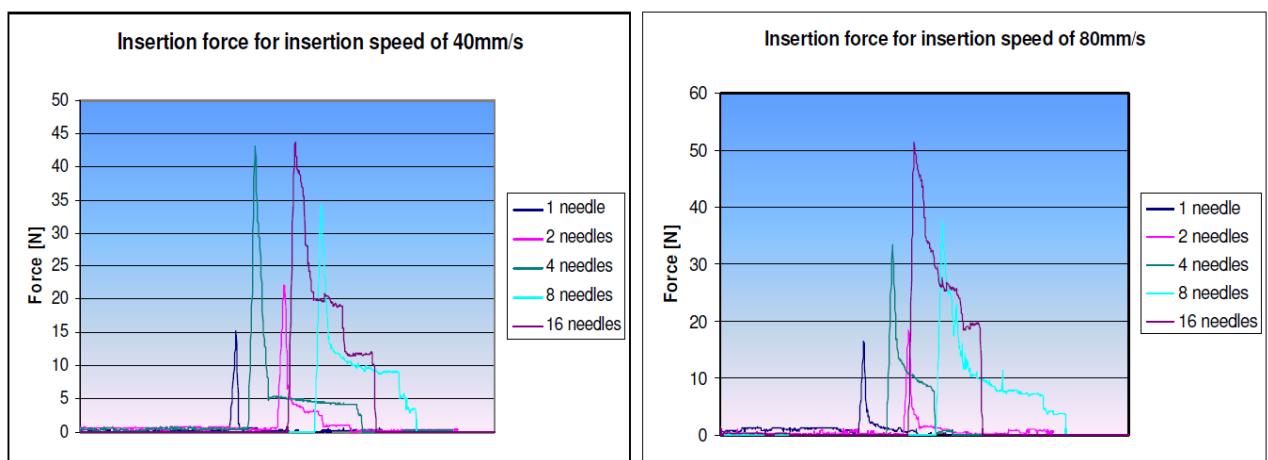


Рисунок 6.12 –Графики зависимости усилия инъекции от скорости инъекции.

В заключении был сделан вывод о том, что значительной разницы в приложенном усилии при скоростях больших, чем 40 мм/с не наблюдается. Таким образом, оптимальный диапазон скорости продольного перемещения для робота-манипулятора с точки зрения приложения усилий должен находиться в пределах от 0-40 мм/с.

Порог чувствительности к усилию приложенному в любом направлении по отношению к оси инструмента не менее 0,1 Н. Требования к устройству представлены в таблице 7.

Для обеспечения необходимой точности позиционирования хирургического инструмента с помощью обратной связи по положению в устройстве перемещения игл должен быть предусмотрен многокоординатный акселерометр.

Таблица 7 – Устройство перемещения игл

Устройство перемещения игл	
Требования	Значения
Длина перемещения	100,0 мм
Диапазон прилагаемых усилий к хирургическому инструменту	10,0 – 20,0 Н
Диапазон скорости поступательного перемещения	5,0-30,0 мм/с
Диапазон угловой скорости	0,0 – 5 об/с
Точность позиционирования хирургического инструмента	0,1 мм
Число степеней подвижности	2 (поступательная и вращательная)
Порог чувствительности к усилию приложенному в любом направлении по отношению к оси инструмента	<0,1 Н
Интерфейс взаимодействия	RS485, USB 2.0

6.4 Разработка технических требований к очувствлённому приводу для измерения прилагаемых усилий

Устройство перемещения игл в конструктивном исполнении должно содержать датчик по измерению усилия, прилагаемого к оси иглы и датчик измерения положения. Датчик усилия должен иметь порог чувствительности к усилию приложенному в любом направлении по отношению к оси инструмента не менее 0,1 Н. Требования к датчику усилия представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Требования к очувствлённому приводу

Очувствлённый привод	
Требования	Значение
Диапазон измеряемых усилий	0,0 – 4500 гр
Чувствительность	0,24 мВ/гр
Изменение чувствительности	0,012 мВ/гр
Интерфейс	RS-485
Время ответа	0,1 мс

Датчик положения должен быть вмонтирован в устройство перемещения игл для обеспечения обратной связи по положению хирургического инструмента в области опухоли в трёхмерном пространстве. Требования к датчику усилия представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Требования к датчику положения

Датчик положения в 3-х мерном пространстве	
Требования	Значение
Диапазон измеряемых отклонений	$\pm 2000^{\circ}/\text{с}$
Чувствительность	17,5 $\text{м}^{\circ}/\text{с}$
Интерфейс	SPI/ I2C

6.5 Разработка технических требований к пульту управления роботом-манипулятором

В макете планируется реализовать ручную систему управления манипулятором и устройством перемещения игл на базе джойстиков на всех этапах планирования и проведения операции. Джойстики должны быть сопряжены с пользовательским компьютером. Джойстик должен иметь управление по трём осям и управлять всеми степенями свободы робота. Джойстик для устройства перемещения игл должен обеспечивать управление по продольному перемещению и угловому вращению инструмента. Требования к джойстикам представлены в таблице 10

Таблица 10 – Требования к джойстикам

Джойстик управления манипулятором		Джойстик управления устройством перемещения игл	
Требования	Значение	Требования	Значение
Канал управления по оси X		Канал управления по оси X	
Канал управления по оси Y		Канал управления угловой скоростью	
Канал управления по оси Z		-	
Напряжение питания	+5 В	Напряжение питания	+5 В
Ток	От 7.2 до 16.8 мА	Ток	От 4.8 до 11 мА
Интерфейс	USB 2.0	Интерфейс	USB 2.0
Точность	±2%	Точность	±2%
Рабочая сила	Не более 60 Н	Рабочая сила	Не более 60 Н
Принцип действия	Датчик Холла, потенциометр	Принцип действия	Датчик Холла, потенциометр

6.6 Разработка технических требований к системе управления для обеспечения выдачи управляющих команд

Система управления должна состоять из двух управляющих программ. Одна программа отвечает за управление приводами робота для подвода устройства перемещения игл в нужную точку пространства перед операцией. Вторая программа отвечает за управление устройством перемещения игл по двум скоростям: поступательной и угловой. Система должна иметь два режима управления: полностью ручной режим управления на каждом из этапов операции полуавтоматический режим управления с возможностью в любой момент времени включать ручной режим управления.

Система управления должна быть обеспечена дистанционным управлением с помощью джойстика или пульта управления отдельно для робота и отдельно для устройства перемещения игл. Система управления должна включать в себя:

- пользовательский компьютер с установленным программным обеспечением;
- пульт управления сопряжённый с пользовательским компьютером для управления приводами и устройством перемещения игл;
- систему обратной связи по усилию с порогом чувствительности не менее 0,1 Н;
- систему обратной связи по положению с погрешностью позиционирования хирургического инструмента не более 0,5 мм;
- удобный пользовательский интерфейс на русском языке;
- погрешность введения микроисточников не более 0,5 см;

Приведём общий перечень технических требований к компонентам роботизированной системы в таблице 11.

Таблица 11 – Сводная таблица технических требований к компонентам макета роботизированной системы

Компоненты макета роботизированной системы	
Робот-манипулятор	
Технические требования	Значения
Масса	<20 кг
Номинальная грузоподъёмность робота	<5,0 кг
Число степеней подвижности	6
Точность позиционирования схвата по отношению к зафиксированному основанию робота – базе	<0,1 мм
Протокол обмена данными	TCP/IP Ethernet, Modbus TCP, USB 2.0
Способ крепления	Фиксированное положение манипулятора на стойке, штанге
Устройство перемещения игл	

Требования	Значения
Длина перемещения	100,0 мм
Диапазон прилагаемых усилий к хирургическому инструменту	10,0 – 20,0 Н
Диапазон скорости поступательного перемещения	5,0-30,0 мм/с
Диапазон угловой скорости	0,0 – 5 об/с
Точность позиционирования хирургического инструмента	0,1 мм
Число степеней подвижности	2 (поступательная и вращательная)
Порог чувствительности к усилию приложенному в любом направлении по отношению к оси инструмента	<0,1 Н
Интерфейс взаимодействия	RS485, USB 2.0

Очувствлённый привод

Требования	Значение
Диапазон измеряемых усилий	0,0 – 4500 гр
Чувствительность	0,24 мВ/гр
Изменение чувствительности	0,012 мВ/гр
Интерфейс	
Время ответа	0,1 мс

Датчик положения в 3-х мерном пространстве

Требования	Значение
Диапазон измеряемых отклонений	± 250 °/с
Чувствительность	17,5 м°/с
Интерфейс	SPI/ I2C

Джойстик управления манипулятором

Требования	Значение
Количество осей	3
Напряжение питания	+5В

Принцип действия	Датчик Холла, потенциометр
Наличие кнопок на рукоятке	да
Рабочая температура	-10,0...+85,0 С
Рабочая сила	<60 Нм

Джойстик управления устройством перемещения игл

Количество осей	2
Напряжение питания	+5В
Принцип действия	Датчик Холла, потенциометр
Наличие кнопок на рукоятке	да
Рабочая температура	-10,0...+85,0 С
Рабочая сила	<60 Нм

Система управления макетом роботизированной системы

Требования	Значение
Количество программ управления	2 (программа управления манипулятором, программа управления устройством перемещения)
Наличие полуавтоматического режима управления	Да
Наличие ручного режима управления на любом из этапов проведения операции	Да
Ручной режим работы должен быть обеспечен управлением с помощью джойстиков	Да
Наличие пользовательского компьютера с программным обеспечением	Да
Наличие системы обратной связи по усилию с порогом чувствительности не менее 0,1 Н;	Да
Наличие системы обратной связи по положению с погрешностью позиционирования хирургического инструмента не более 0,5 мм;	Да
Пользовательский интерфейс на русском языке	Да

Исходя из требуемых задач, разработаны технические требования к компонентам макета роботизированной системы. Представленные требования являются дополнением к требованиям технического задания и позволяют осуществить детальный анализ и выбор соответствующей компонентной базы.

7 Разработка технических требования к компонентам экспериментального стенда для проведения исследования

7.1 Характеристики и состав экспериментального стенда роботизированной системы

В техническом задании на этапе теоретических исследований и разработки математической модели необходимо определить технические требования к компонентам экспериментального стенда роботизированной системы. Компоновка экспериментального стенда роботизированной системы представлена на рисунке 7.1.

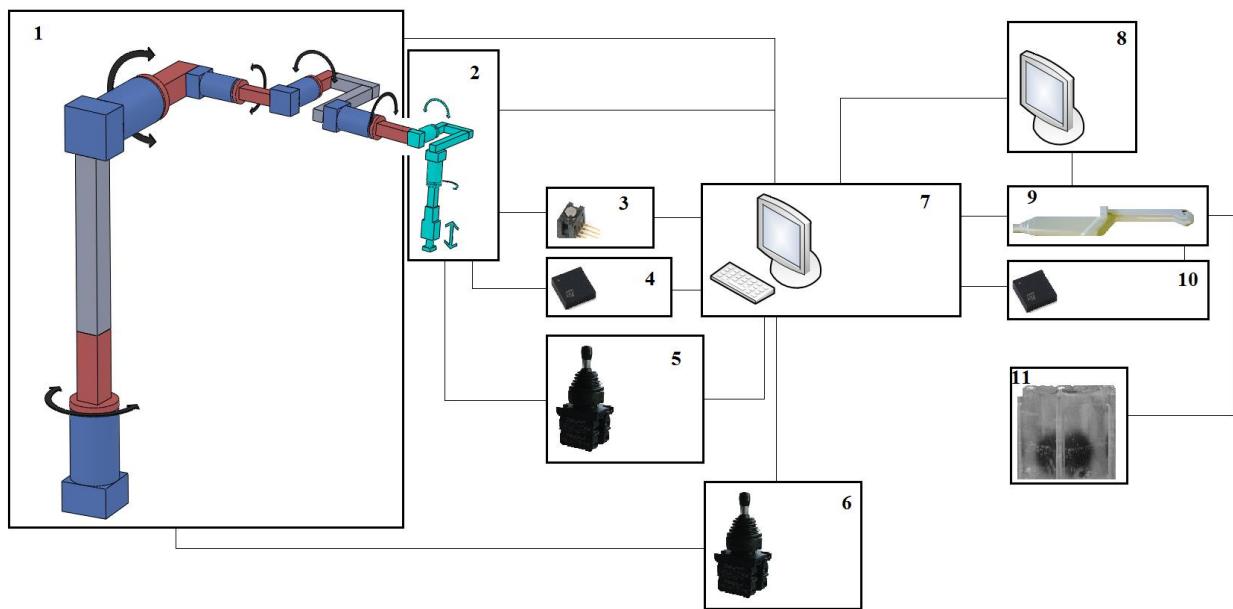


Рисунок 7.1 – Компоновка экспериментального стенда роботизированной системы, 1 – РМ, 2 – УПИ, 3 – датчик усилия, 4 – датчик положения, 5 – джойстик управления РМ, 6 – джойстик управления УПИ, 7 – ПК, 8 – монитор УЗИ, 9 – УЗИ сканер, 10 – акселерометр, 11 – ФО.

Согласно техническому заданию в состав экспериментального стенда входят:

- система визуализации и контроля для визуализации траектории движения игл внутри тела человека и измерения точного положения введённых микроисточников;

- несущая рама для крепления фантома тела человека, макета роботизированной системы и устройств системы визуализации и контроля.

Требования, предъявляемые к экспериментальному стенду:

- создаваемый экспериментальный стенд должен обеспечивать визуализацию траектории движения игл внутри тела человека и измерение точного местоположения введенных микроисточников с помощью УЗ или МРТ датчиков;
- погрешность измерения местоположения микроисточников не более 0,1 мм;
- визуализация траектории движения игл в режиме реального времени
- разрабатываемое ПО должно осуществлять оперативный сбор данных, их обработку в режиме реального времени, визуализацию на экране ПК, необходимое взаимодействие с оператором, выработку команд управления частей макета роботизированной системы.

7.2 Разработка технических требований к системе визуализации

Система визуализации должна состоять из УЗ сканера, монитора, блока интерфейсов и пользовательского компьютера. Основные технические требования к системе визуализации представлены в таблице 12.

Таблица №12 – Технические требования к системе визуализации

Система визуализации	
Требования	Значение
Сопряжение монитора УЗИ, сканера УЗИ и пользовательского компьютера	да
Режимы сканирования	Конвексные, линейные, микроконвексные, эндокавитальные, интраоперационные
Разрешение получаемого изображения	1024*768 пикселей

Визуализация в режиме реального времени	Да
Частота смены кадров	<15 Гц
Разрешающая способность системы визуализации на частоте 10 МГц	<0,1 мм
Виды эхограмм	B, B+B, M, B+M, D, B+D, B+CFM, B+CFM+D, B+PD, B+PD+D
Диапазон отображаемой глубины зондирования	4-24 см
Число уровней квантования сигнала, отображаемого на экране видеомонитора (градации серого)	256
Разрешающая способность прибора на частоте 10,0 МГц в средней части области ультразвукового обзора	Не хуже 0,1 мм
Формат эхограммы	.jpg; .dcm;
Наличие кинопетли	Не менее 500 кадров
Интерфейс взаимодействия	USB 2.0; SVGA/DVI, RS232, Ethernet

7.3 Разработка технических требований к точности измерения положений введённых микроисточников

Перед непосредственным проведением операции брахитерапии осуществляется её планирование с применением системы визуализации на базе УЗ сканера, сопряжённой со специальным программным обеспечением, рассчитывающим координаты закладки микроисточников в область опухоль. Во время проведения операции пациент может совершать телодвижения, которые могут изменить местоположение рака простаты и таким образом привести к смене координат, рассчитанных ранее. Также, смещение опухоли может произойти по причине перемещений самого зонда УЗ сканера в прямой кишке вблизи опухоли. Поэтому в системе должна быть

предусмотрена обратная связь по положению опухоли в трёхмерном пространстве, которая позволит скорректировать координаты уже во время операции. Для этого необходимо, чтобы в составе УЗ сканера имелся акселерометр. Технические требования в точности измерения представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Технические требования к точности измерения положений введённых микроисточников

Технические требования к точности измерения положений микроисточников	
Требований	Значение
Погрешность измерений системы визуализации местоположения микроисточников	<0,1 мм
Наличие многокоординатного акселерометра, встроенного в зонд УЗ сканера	Да

7.4 Разработка технических требований к системе управления экспериментальным стендом,

Основной перечень технических требований к системе управление перечислен в разделе, посвящённом техническим требованиям к макету роботизированной системы. Здесь же перечислим требования, которые будут касаться управления системы визуализации и её сопряжения с другими элементами. Технические требования к системе управления представлены в таблице 14.

Таблица 14— Технические требования к системе управления экспериментальным стендом

Система управления экспериментальным стендом	
Требования	Значение
Наличие ручного режима управления на всех этапах проведения операции	Да
Наличие полуавтоматического режима управления	Да
Частота опроса датчиков	<1000Гц
Наличие алгоритма диагностики всех узлов	Да
Наличие алгоритма калибровки всех узлов	Да
Наличие алгоритма сопряжения с программным обеспечением по дозиметрическому планированию операции	Да
Интерфейс взаимодействия между УЗИ сканером и системой управления	USB 2.0; USB 3.0
Интерфейс взаимодействия датчиков и системы управления	RS485
Интерфейс взаимодействия джойстиков и системы управления	RS485; USB 2.0; USB 3.0
Интерфейс взаимодействия робот-манипулятора и системы управления	Ethernet TCP
Интерфейс взаимодействия устройства перемещения игл и системы управления	RS485
Интерфейс взаимодействия монитора УЗИ с монитором пользовательского ПК в составе системы управления	DVI, VGA
Интерфейс внутреннего взаимодействия системы управления	SATA
Диапазон скорости передачи данных по каналу обратной связи между измерительной системой (датчик усилия, многокоординатный акселерометр УЗИ, акселерометр устройства перемещения игл, датчик УЗИ) и системой управления	25-35 Мбит/с
Диапазон скорости передачи данных	1-10 Гбит/с

управляющих сигналов между роботом-манипулятором и системой управления	
Диапазон скорости передачи данных управляющих сигналов между устройством перемещения игл и системой управления	25-35 Мбит/с
Диапазон скорости передачи данных внутри системы управления	2,4-4,8 Гбит/с
Диапазон скорость передачи данных между джойстиками и системой управления	25-35 Мбит/с; 2,4-4,8 Гбит/с
Язык интерфейса программного обеспечения системы управления	русский

7.5 Разработка технических требований к ультразвуковому сканеру

В состав ультразвукового сканера должен быть включён акселерометр для обеспечения обратной связи по положению пациента в пространстве. Сканер должен быть сопряжён с пользовательским компьютером для передачи информации в виде изображений и координат с положением опухоли в пространстве. Основные технические требования к УЗ сканеру представлены в таблице .15

Таблица 15 – Технические требования к УЗ сканеру

УЗ сканер	
Требования	Значение
Разрешающая способность при частоте 10 МГц и выше	<0,1 мм
Частота смены кадров	15 Гц
Увеличение изображения в режимах В 2В 4В с кратностью	2
Скорость формирования М- и D-разверток регулируемая	от 2,5 до 10 см/сек.
Число зон регулировки усиления по глубине (зон ВАРУ)	7
Фильтр сглаживания изображения уровней	4

Межкадровое усреднение эхограмм (корреляция) уровней	4
Количество видов характеристик гамма-коррекции	6
Палитры отображения эхограмм видов	6
Виды регулировок параметров изображения	услаждение, ВАРУ, контраст.
Интерфейс	USB 2.0; USB 3.0;

7.6 Разработка технических требований к фантуому тканей пациента

Наиболее часто, в качестве основного материала, имитирующего фантом ткани человека, для проведения экспериментальных исследований по отработке криволинейной траектории иглы, определению положения иглы и положений введённых микроисточников используется желатин. Это близкий по своим свойствам материал к тканям человека. Представим ряд технических требований в таблице 16.

Таблица 16 – Технические требования к фантуому тканей человека

Фантом тканей	
Требования	Значение
Материал	Желатин
Эластичность	30-40 кПа
Габариты	170*30*200мм
Скорость распространения ультразвука	1300-1500 м/с

Приведём общий перечень технических требований к компонентам экспериментального стенда роботизированной системы в таблице 17.

Таблица 17 – Сводная таблица технических требований к компонентам экспериментального стенда роботизированной системы

Компоненты экспериментального стенда роботизированной системы	
Система визуализации	
Технические требования	Значения

Сопряжение монитора УЗИ, сканера УЗИ и пользовательского компьютера	да
Режимы сканирования	Конвексные, линейные, микроконвексные, эндокавитальные, интраоперационные
Разрешение получаемого изображения	1024*768 пикселей
Визуализация в режиме реального времени	Да
Частота смены кадров	<15 Гц
Разрешающая способность системы визуализации на частоте 10 МГц	<0,1 мм
Виды эхограмм	B, B+B, M, B+M, D, B+D, B+CFM, B+CFM+D, B+PD, B+PD+D
Диапазон отображаемой глубины зондирования	4-24 см
Число уровней квантования сигнала, отображаемого на экране видеомонитора (градации серого)	256
Разрешающая способность прибора на частоте 10,0 МГц в средней части области ультразвукового обзора	Не хуже 0,1 мм
Формат эхограммы	.jpg; .dcm;
Наличие кинопетли	Не менее 500 кадров
Интерфейс взаимодействия	USB 2.0; SVGA/DVI, RS232, Ethernet
Точность измерения положений введенных микроисточников	
Технические требования	Значения
Погрешность измерений системы визуализации местоположения микроисточников	<0,1 мм
Наличие многокоординатного акселерометра, встроенного в зонд УЗ сканера	Да
Система управления экспериментальным стендом	
Требования	Значение
Наличие ручного режима управления на всех этапах проведения операции	Да
Наличие полуавтоматического режима	Да

управления	
Частота опроса датчиков	<1000Гц
Наличие алгоритма диагностики всех узлов	Да
Наличие алгоритма калибровки всех узлов	Да
Наличие алгоритма сопряжения с программным обеспечением по дозиметрическому планированию операции	Да
Интерфейс взаимодействия между УЗИ сканером и системой управления	USB 2.0; USB 3.0
Интерфейс взаимодействия датчиков и системы управления	RS485
Интерфейс взаимодействия джойстиков и системы управления	RS485; USB 2.0; USB 3.0
Интерфейс взаимодействия роботоманипулятора и системы управления	Ethernet TCP
Интерфейс взаимодействия устройства перемещения игл и системы управления	RS485
Интерфейс взаимодействия монитора УЗИ с монитором пользовательского ПК в составе системы управления	DVI, VGA
Интерфейс внутреннего взаимодействия системы управления	SATA
Диапазон скорости передачи данных по каналу обратной связи между измерительной системой (датчик усилия, многокоординатный акселерометр УЗИ, акселерометр устройства перемещения игл, датчик УЗИ) и системой управления	25-35 Мбит/с
Диапазон скорости передачи данных управляющих сигналов между роботоманипулятором и системой управления	1-10 Гбит/с
Диапазон скорости передачи данных управляющих сигналов между устройством перемещения игл и системой управления	25-35 Мбит/с
Диапазон скорости передачи данных внутри системы управления	2,4-4,8 Гбит/с
Диапазон скорость передачи данных между	25-35 Мбит/с;

джойстиками и системой управления	2,4-4,8 Гбит/с
Язык интерфейса программного обеспечения системы управления	русский
УЗИ сканер	
Требования	Значение
Разрешающая способность при частоте 10 МГц и выше	<0,1 мм
Частота смены кадров	15 Гц
Увеличение изображения в режимах В 2В 4В с кратностью	2
Скорость формирования М- и D-разверток регулируемая	от 2,5 до 10 см/сек.
Число зон регулировки усиления по глубине (зон ВАРУ)	7
Фильтр сглаживания изображения уровней	4
Межкадровое усреднение эхограмм (корреляция) уровней	4
Количество видов характеристик гамма-коррекции	6
Палитры отображения эхограмм видов	6
Виды регулировок параметров изображения	усиление, ВАРУ, контраст.
Интерфейс	USB 2.0; USB 3.0;
Фантом тканей	
Требования	Значение
Материал	Желатин
Эластичность	30-40 кПа
Габариты	170*30*200мм
Скорость распространения ультра звука	1300-1500 м/с

Разработанные технические требования экспериментального стенда для проведения исследований являются дополнением к требованиям технического задания и позволяют осуществить детальный анализ и выбор компонентной базы системы сопряжения и системы визуализации.

8 Анализ и выбор компонентной базы макета

Согласно требованию технического задания порог чувствительности к усилию, приложеному в любом направлении по отношению к оси инструмента, не менее 0,1 Н. Согласно техническим требованиям к устройству перемещения игл, представленных в отчёте «Разработка технических требований к компонентам макета роботизированной системы» куда входит датчик усилия, он должен обеспечить измерение диапазона прилагаемых усилий от 10 до 20 ньютонов и иметь интерфейс взаимодействия с пользовательским компьютером – RS485 или USB 2.0.

8.1 Анализ и выбор датчика усилия

В ходе анализа представленных на рынке датчиков усилия, удовлетворяющих техническим требованиям было найдено пять вариантов:

- Датчик усилия FSG15N1A производитель HoneyWell;
- Датчик усилия FSL05N2C производитель HoneyWell;
- Датчик усилия Model 13 производитель HoneyWell;
- Датчик усилия 45E12A4 производитель JR3 Inc;
- Датчик усилия FT150 производитель Robotiq;

Рассмотрим более подробно каждый из этих вариантов.

1 Анализ технических характеристик датчика усилия FSG15N1A производства HoneyWell

Датчики для измерения усилия производства HoneyWell серии FS позиционируются как компактное техническое решение для точного измерения прилагаемых усилий. Датчик FSG15N1A построен на базе специального пьезорезистивного кремниевого чувствительного элемента. Конструктив датчика представляет собой запатентованную модульную конструкцию, которая совместно с инновационной технологией эластомеров и специально спроектированного и отлитого пластикового корпуса позволяет

измерять максимальные нагрузки в 4,5 кг и больше. Внешний вид датчика представлен на рисунке 8.1

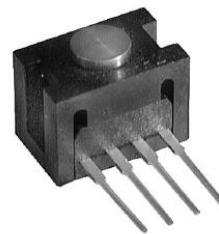


Рисунок 8.1 – Внешний вид датчика FSG15N1A производства HoneyWell

Конструктивное исполнение с указанием размеров представлено на рисунке 8.2.

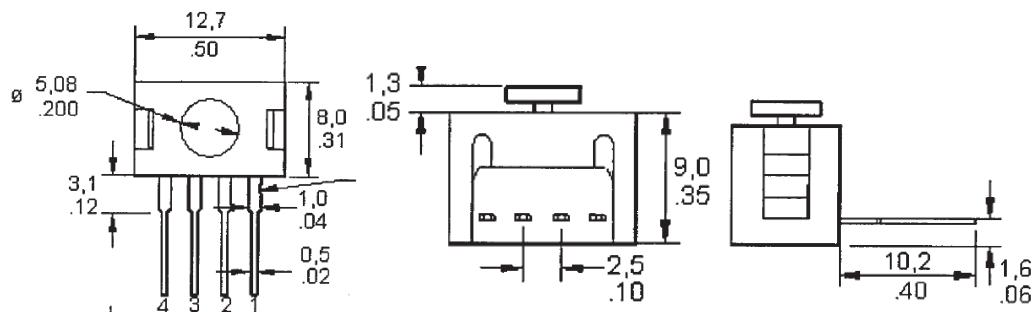


Рисунок 8.2 – Конструктивное исполнение датчика FSG15N1A производства HoneyWell

Рассмотрим технические характеристики датчика, приведённые в таблице 18

Таблица №18 – Технические характеристики датчика FSG15N1A

Датчик FSG15N1A	
Параметры	Значения
Включение(возбуждение)	10 VDC
Смещение	-30 мВ +30 мВ
Рабочий диапазон измерения силы	От 0 до 1500 гр.
Чувствительность	0,24 мВ/гр
Чувствительность к сдвигу	0,012 мВ/гр

Повторяемость	30 гр
Входное сопротивление	5 КОм
Максимальная нагрузка	4,5 кг
Рабочая температура	От -40 до +85 С
Масса	11 гр

Из представленных характеристик наиболее важной для нас является чувствительность датчика. В таблице представлены два параметра: «чувствительность» и «чувствительность к сдвигу». Оба значения данных параметров удовлетворяют требованию технического задания, где порог чувствительности к усилию, приложенному в любом направлении по отношению к оси инструмента, не менее 0,1 Н. При чувствительности датчика в 0,24 мВ/гр данное требование обеспечивается на два порядка выше. Также важно отметить диапазон измеряемых усилий. В отчёте «Разработка технических требований к компонентам макета роботизированной системы» требование к диапазону измеряемых усилий составляло от 10 до 20 Ньютонов. Датчик FSG15N1A обеспечивает диапазон измерений от 0 до 1,5 кг и при максимальной нагрузке до 4,5 кг, что также с запасом удовлетворяет требованию технического задания.

Таким образом, датчик FSG15N1A производства HoneyWell удовлетворяет техническим требованиям согласно техническому заданию и требованиям, предъявляемым к компонентам макета роботизированной системы.

2 Анализ технических характеристик датчика усилия FSL05N2C производства HoneyWell

Датчик усилия FSL05N2C также относится к серии FS и обладает теми же особенностями, что и датчик FSG15N1A. Внешний вид датчика представлен на рисунке 8.3.



Рисунок 8.3 – Внешний вид датчика FSL05N2C производства HoneyWell

Конструктивное исполнение с указанием размеров представлено на рисунке 8.4

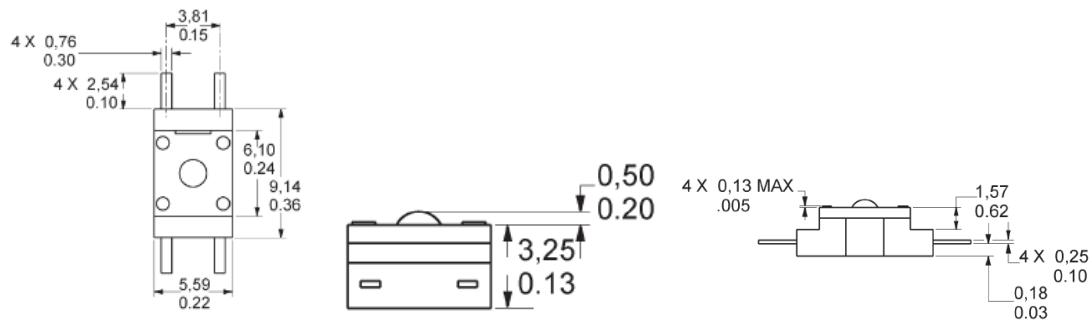


Рисунок 8.4 – Конструктивное исполнение датчика FSL05N2C производства HoneyWell

Рассмотрим технические характеристики датчика, приведённые в таблице №19

Таблица №19 – Технические характеристики датчика FSL05N2C

Датчик FSL05N2C	
Параметры	Значения
Включение(возбуждение)	5 VDC
Смещение	-15 мВ +15 мВ
Рабочий диапазон измерения силы	От 0 до 500 гр.
Чувствительность	0,12 мВ/гр
Чувствительность к сдвигу	0,012 мВ/гр
Повторяемость	10 гр

Входное сопротивление	5 КОм
Максимальная нагрузка	4,5 кг
Рабочая температура	От +2 до +40 С
Масса	12 гр

Исходя из приведённых характеристик, сравнивая датчик FSL05N2C с датчиком FSG15N1A, чувствительность в два раза выше, так же как и смещение. Повторяемость в три раза лучше. Однако нагрузка в три раза меньше, что не удовлетворяет диапазону рабочих усилий от 10 до 20 Ньютонов.

Таким образом, датчик усилий не в полной мере удовлетворяет нашим требованиям.

3 Анализ технических характеристик датчика усилия Model 13 производства HoneyWell

Датчик усилия Model 13 производителя HoneyWell относится к серии миниатюрных тензометрических датчиков. Он имеет более широкий диапазон измеряемых усилий от 150 гр до 440 кг.

Внешний вид датчика и его конструктивное исполнение представлены на рисунках 8.5 и 8.6 соответственно.



Рисунок 8.5 – Внешний вид датчика Model 13 производства HoneyWell

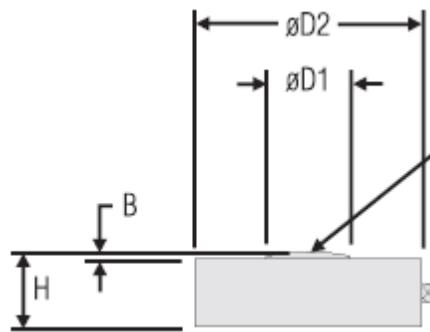


Рисунок 8.6 – Конструктивное исполнение датчика Model 13
производства HoneyWell

Рассмотрим технические характеристики датчика, представленные в таблице 20

Таблица №20 – Технические характеристики датчика Model 13

Датчик Model 13	
Параметры	Значения
Включение(возбуждение)	5 VDC
Рабочий диапазон измерения силы	От 0 до 440 кг.
Допуск для диапазона от 2,7 кг до 440 кг	2,0 мВ/Вр
Повторяемость	0,1% от величины
Входное сопротивление	5 КОм
Максимальная нагрузка	440 кг
Рабочая температура	От -54 до +121 С
Масса	9 гр

Из приведённых характеристик, отличительной особенностью датчика является широкий диапазон измеряемых нагрузок, миниатюрные размеры, масса, чувствительность и точность измерений, которые удовлетворяют требованиям технического задания. Данная модель применялась в работе [22] для измерения усилий при внедрении и перемещении иглы внутри фантома ткани человека. Датчики располагались в трёх местах для измерения усилий на приводе для перемещения стилета, на приводе для перемещения канюли, в месте выхода иглы из держателя. Исследования показали, что при таком

расположении датчиков формируется обратная связь с высокой степенью достоверности и точности получаемой информации.

Таким образом, рассмотренный датчик Model 13 производства HoneyWell удовлетворяет требованиям технического задания.

4 Анализ технических характеристик датчика усилия 45E12A4 производства JR3 Inc

Датчики Е-серии производителя JR3 Inc представляют собой специализированное решение для робототехнических систем для измерения прилагаемых усилий. Это многоосевой датчик с шестью степенями подвижности, цилиндрической формы, корпус которого сделан из алюминия (опционально корпус может быть изготовлен из нержавеющей стали или титана). Датчик является законченным техническим решением в состав которого входит измерительное устройство и вычислительная плата с аналоговыми и цифровыми компонентами. Внешний вид датчика представлен на рисунке 8.7.

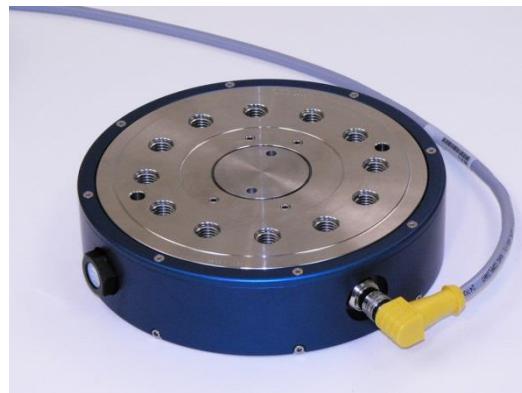


Рисунок 8.7 – Внешний вид датчика 45E12A4 производства JR3 Inc

Рассмотрим технические характеристики датчика приведённые в таблице 21.

Таблица №21 – Технические характеристики датчика 45E12A4

Датчик 45E12A4	
Параметры	Значения
Номинальная точность для всех осей	0,25% от измеряемого диапазона
Включение(возбуждение)	8 VDC

Рабочий диапазон измерения силы	От 0 до 100 Н.
Цифровое разрешение	0,013 Н
Жёсткость	$5,3 \cdot 10^6$ Н/м
Максимальная нагрузка по оси	950 Н
Рабочая температура	От -40 до +65 С
Масса	530 гр

Из приведённых характеристик, очевидно, что датчик удовлетворяет предъявляемым требованиям технического задания. Отличительной особенностью датчика является его комплектность. Датчик поставляется вместе с блоком питания представленным на рисунке 8.8 и платой управления представленной на рисунке 8.8.



Рисунок 8.8 – Блок питания для датчика 45E12A4 производства JR3 Inc

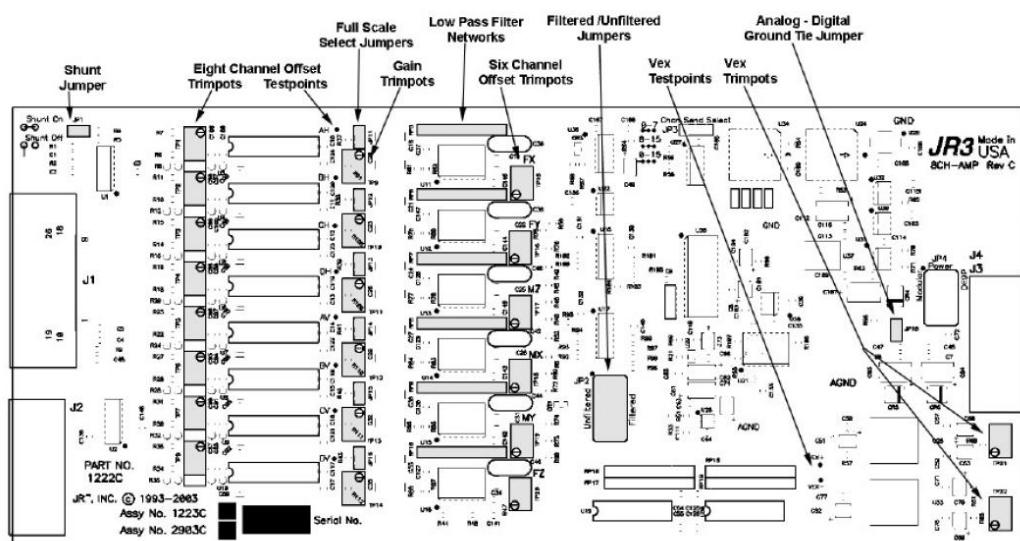


Рисунок 8.9 – Плата управления для датчика 45E12A4 производства JR3

Таким образом, рассматриваемый датчик усилия удовлетворяет требованиям технического задания.

5 Анализ технических характеристик датчика усилия FT 150 производства компании Robotiq

Датчик усилия FT 150 производителя Robotiq является аналогом рассмотренного ранее датчика 45E12A4 от компании JR3. Это многоосевой датчик с шестью степенями подвижности, цилиндрической формы. Датчик позиционируется как комплексное техническое решение, включающее в себя сам датчик, измерительную систему на базе платы с микроконтроллером. Датчик устойчив к внешним электрическим помехам, совместим с промышленными роботами, измерительная система адаптирована для программирования в среде Linux и Windows. Датчик представлен на рисунке 8.10.



Рисунок 8.10 – Внешний вид датчика FT150 производства Robotiq

Рассмотрим технические характеристики датчика приведённые в таблице 22.

Таблица №22 – Технические характеристики датчика FT 150

Датчик FT 150	
Параметры	Значения
Точность измерений	0,2 Н
Включение(возбуждение)	6-28 VDC
Рабочий диапазон измерения силы	От 0 до 150 Н.
Дрейф	±3 Н
Жёсткость	$3,9 \cdot 10^6$ Н/м
Максимальная нагрузка по оси	5*рабочий диапазон
Рабочая температура	От +15 до +35 С
Интерфейс	RS485, RS232, USB 2.0
Масса	650 гр

Из приведённых характеристик ясно, что датчик удовлетворяет требованиям технического задания, однако имеет относительно небольшой диапазон рабочей температуры и точность измерений, превышающую на одну десятую требования по порогу измеряемого усилия.

Таким образом, данный вариант может рассматриваться как техническое решение по измерению усилия.

Для решения поставленной задачи, с учётом требований технического задания на рынке представлены два типа датчиков усилия: миниатюрные датчики и датчики в виде комплексного технического решения, специально разработанные для робототехнических средств. Для оптимального решения поставленной задачи и использования предложенных технических решений на последующих этапах проекта целесообразно использовать компоненты, в которых заложена многофункциональном. К такого рода компонентам относятся измерительные системы FT 150 производства компании Robotiq и 45E12A4 производства компании JR3 Inc.

8.2 Анализ и выбор датчика положения в пространстве

Согласно требованию технического задания создаваемый экспериментальный стенд должен обеспечивать визуализацию траектории движении игл внутри тела человека и измерение точного местоположения введенных микроисточников с помощью УЗ или МРТ датчиков. При этом погрешность измерения местоположения микроисточников не более 0,1 мм, а скорость движения устройства перемещения не должна превышать 30 мм/с. Для решения данной задачи необходимо использовать датчик положения(многокоординатный акселерометр или гироскоп), установленный на устройстве перемещения игл, который бы позволял точно определять местоположение хирургического инструмента в пространстве для совместного осуществления корректировки движения инструмента в фантоме опухоли и для обеспечения требуемой точности позиционирования микроисточников, а также для измерения скорости движения.

В ходе анализа представленных на рынке датчиков положения, удовлетворяющих техническим требованиям было найдено шесть вариантов:

- Датчик положения ADXL313 производитель Analog Devices
- Датчик положения LIS331DLH производитель STMicroelectronics
- Датчик положения L3GD20 производитель STMicroelectronics
- Датчик положения LSM303DLHC производитель STMicroelectronics
- Датчик положения UM7 производитель CH Robotics
- Датчик положения Adafruit 9-DOF IMU Breakout производитель Adafruit Industries.

Рассмотрим более подробно каждый из этих вариантов.

1 Анализ технических характеристик датчика положения ADXL313 производства Analog Devices

Датчик ADXL313 производитель Analog Devices представляет собой миниатюрный датчик положения с низким энергопотреблением и уровнем шума 150мкГ/Гц. Трёх осевой, с высоким разрешением (13 бит) измерения до

± 4 g. Передача данных может осуществляться либо через SPI интерфейс либо через I2C интерфейс. Внешний вид датчика представлен на рисунке 8.11.

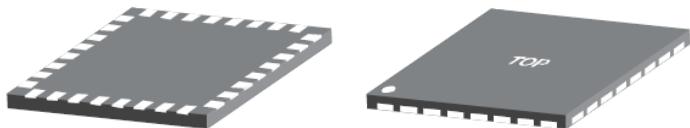


Рисунок 8.11 – Внешний вид датчика ADXL313 производства Analog Devices

Рассмотрим технические характеристики датчика приведённые в таблице 23.

Таблица №23 – Технические характеристики датчика ADXL313

Датчик ADXL313	
Параметры	Значения
Диапазон измерений	± 0.5 g, ± 1 g, ± 2 g, ± 4 g
Нелинейность	0,5% от измеряемого диапазона
Выходные значения под диапазонами измерений	
± 0.5 g	
± 1 g	10 Бит
± 2 g	11 Бит
± 4 g	12 Бит
	13 Бит
Чувствительность по XYZ	
± 0.5 g	1024 ± 0.01 LSB/g
± 1 g	512 ± 0.01 LSB/g
± 2 g	256 ± 0.01 LSB/g
± 4 g	128 ± 0.01 LSB/g
Уровень шума по осям	
X	150 мкг/Гц
Y	150 мкг/Гц
Z	250 мкг/Гц

Напряжение питания Vs	От 2,0 до 3,6 В
Напряжение на интерфейсе	От 1,7 до Vs В
Ток при частоте: >100 Гц	170 мкА
<10 Гц	55 мкА
Диапазон рабочих температур	От -40 до +105С
Интерфейс	SPI, I2C
Масса	25 гр
Размеры	5,1*5,1*1,55 мм

Предложенный многокоординатный акселерометр имеет широкий диапазон измерений.

2 Анализ технических характеристик датчика положения LIS331DLH производства STMicroelectronics

Датчик положения LIS331DLH производитель STMicroelectronics является датчиком с очень низким уровнем потребления энергии при высокой производительности. Измерения проводятся по трём осям. Внешний вид датчика представлен на рисунке 8.12.

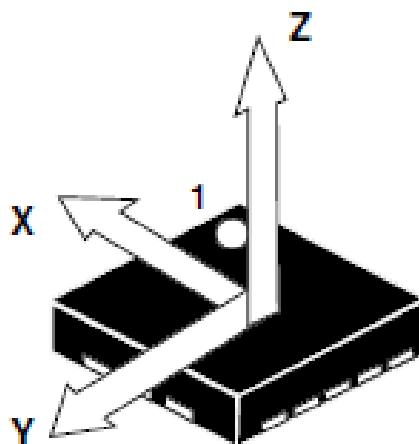


Рисунок 8.12 – Внешний вид датчика LIS331DLH производства STMicroelectronics

Рассмотрим технические характеристики датчика приведённые в таблице 24.

Таблица №24 – Технические характеристики датчика LIS331DLH

Датчик LIS331DLH	
Параметры	Значения
Диапазон измерений	$\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$
Чувствительность по XYZ	
$\pm 2 g$	1 mg/digit
$\pm 4 g$	2 mg/digit
$\pm 8 g$	3,9 mg/digit
Уровень шума по осям XYZ	218 мкг/Гц
Напряжение питания Vdd	От 2,16 до 3,6 В
Напряжение на интерфейсе	От 1,71 до Vdd+0,1 В
Ток при частоте:	250 мкА
Диапазон рабочих температур	От -40 до +85С
Интерфейс	SPI, I2C
Масса	20 гр
Размеры	3*3*1 мм

Датчик имеет более широкий диапазон измеряемых значений.

Остальные параметры и значения практически идентичны датчику ADXL313.

3 Анализ технических характеристик датчика положения L3G20 производства STMicroelectronics

Датчик L3G20 производителя STMicroelectronics изготовлен с использованием выделенного процесса микро обработки поступающей информации. Датчик позиционируется как гироскоп с трёх осевым цифровым выходом. Внешний вид датчика представлен на рисунке 8.13.

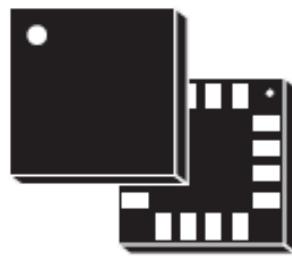


Рисунок 8.13 – Внешний вид датчика L3G20 производства
STMicroelectronics

Рассмотрим технические характеристики датчика приведённые в таблице 25.

Таблица №25 – Технические характеристики датчика L3G20

Датчик L3G20	
Параметры	Значения
Диапазон измерений	± 250 dps, ± 500 dps, ± 2000 dps
Нелинейность	0,2% от диапазона измерений
Чувствительность	
± 250 dps	8.75 mdps/digit
± 500 dps	17.50 mdps/digit
± 2000 dps	70 mdps/digit
Уровень шума	0,03 dps/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Напряжение питания Vdd	От 2,46 до 3,6 В
Напряжение на интерфейсе	От 1,71 до Vdd+0,1 В
Ток при частоте:	6,1 mA
Диапазон рабочих температур	От -40 до +85C
Интерфейс	SPI, I2C
Масса	23 гр
Размеры	4*4*1 мм

4 Анализ технических характеристик датчика положения LSM303DLHC производства STMicroelectronics

Датчик LSM303DLHC производителя STMicroelectronics является измерительной системой состоящей из цифрового линейного 3D датчика ускорения и цифрового линейного 3D магнитного датчика. Датчик имеет три канала по измерению магнитного поля и три канала по ускорению. Датчик включает в себя последовательный интерфейс шины I2C, который поддерживает стандартный и быстрый режим 100 Гц и 400 кГц. Внешний вид датчика представлен на рисунке 8.14.

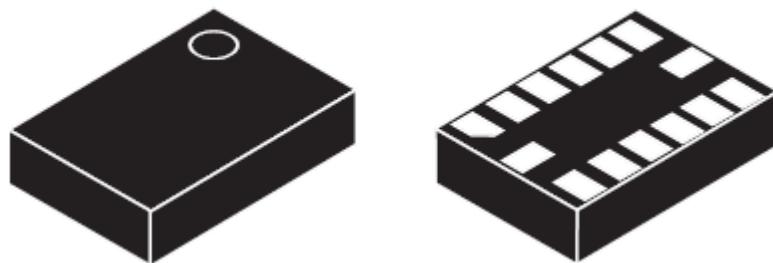


Рисунок 8.14 – Внешний вид датчика LSM303DLHC производства STMicroelectronics

Рассмотрим технические характеристики приведённые в таблице 26.

Таблица №26 – Технические характеристики датчика LSM303DLHC

Датчик LSM303DLHC	
Параметры	Значения
Диапазон измерений	$\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$
Диапазон измерений магнитного поля	$\pm 1,3$ gauss, $\pm 1,9$ gauss, $\pm 2,5$ gauss, $\pm 4,0$ gauss, $\pm 4,7$ gauss, $\pm 5,6$ gauss, $\pm 8,1$ gauss
Нелинейность	0,2% от диапазона измерений
Чувствительность линейного ускорения	1 mg/LSB 2 mg/LSB 4 mg/LSB 12 mg/LSB
Магнитная регулировка усиления	1100 LSB/gauss

	980 LSB/gauss
	855 LSB/gauss
	760 LSB/gauss
	670 LSB/gauss
	600 LSB/gauss
	450 LSB/gauss
	400 LSB/gauss
	355 LSB/gauss
	330 LSB/gauss
	295 LSB/gauss
	230 LSB/gauss
	205 LSB/gauss
Напряжение питания Vdd	От 2,16 до 3,6 В
Уровень шума	220 μ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Напряжение на интерфейсе	От 1,71 до Vdd+0,1 В
Ток при частоте:	110 μ А
Диапазон рабочих температур	От -40 до +85С
Интерфейс	SPI, I2C
Масса	22 гр
Размеры	3*5*1 мм

Датчик имеет избыточные параметры, которые не предусмотрены системой, в которой он планируется использоваться.

5 Анализ технических характеристик датчика положения UM7 производства CH Robotics

Датчик UM7 производителя CH Robotics представляет собой готовое комплексное техническое решение в виде измерительной системы, включающей в себя многокоординатный акселерометр, гироскоп и магнитометр. Датчик имеет регулируемый фильтр низких частот, положение и данные датчика синхронизированы с помощью дополнительного внешнего

модуля GPS. Гибкая архитектура связи позволяет UM7 передавать любую комбинацию данных с индивидуальной регулировкой скоростей. Внешний вид датчика представлен на рисунке 8.15.

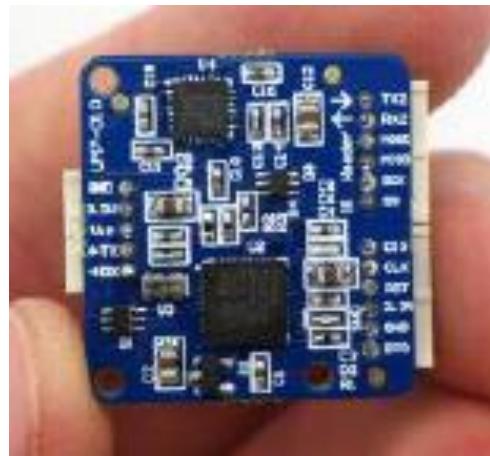


Рисунок 8.15 – Внешний вид датчика UM7 производства CH Robotics
Рассмотрим технические характеристики в приведённой таблице 26.
Таблица №26 – Технические характеристики датчика UM7

Датчик UM7	
Параметры	Значения
Гироскоп	
Статическая точность	$\pm 1^\circ$
Динамическая точность	$\pm 3^\circ$
Повторяемость	0,5 $^\circ$
Разрешающая способность	<0,01 $^\circ$
Уровень шума	0,005 $^\circ/\sqrt{\text{Hz}}$
Нелинейность	0,2 % от измеряемого диапазона
Динамический диапазон	$\pm 2000^\circ/\text{s}$
Напряжение питания Vdd	От 2,16 до 3,6 В
Уровень шума	220 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Акселерометр	
Чувствительность	$\pm 0,02\%/\text{g}$
Уровень шума	400 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

Динамический диапазон	$\pm 8\text{g}$
Магнитометр	
Динамический диапазон	$\pm 1200\text{ uT}$
Напряжение питания	+ 5,0 В
Напряжение на интерфейсе	3,3 В
Ток при частоте:	50 мА
Диапазон рабочих температур	От -40 до +85С
Интерфейс	SPI, TTL UART
Масса	11 гр
Размеры	27 x 26 x 6.5 мм

Конструктивное исполнение датчика представлено на рисунке 8.16.

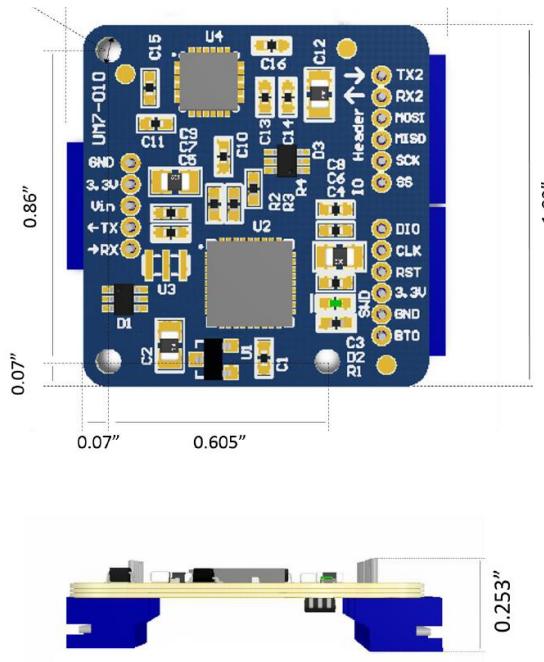


Рисунок 8.16 – Конструктивное исполнение датчика UM7 производства
CH Robotics

Описанный датчик является специализированным решением для применения в робототехнике и удовлетворяет требованиям технического задания.

6 Анализ технических характеристик датчика положения Adafruit 9-DOF IMU Breakout производства Adafruit Industries

Датчик Adafruit 9-DOF IMU Breakout производства Adafruit Industries представляет собой ещё более сложную комплексную измерительную систему. Датчик позволяет измерять 9 различных степеней свободы. Система включает в себя рассмотренные ранее датчик-акселерометр LSM303DLHC и гироскоп L3GD20. Датчики интегрированы на плату управления и сбора информации для её дальнейшей обработки и передаче на управляющее устройство. Система позиционируется как специализированное решение под задачи робототехники. Весь обмен данными построен на шине I2C. Adafruit 9-DOF IMU Breakout поставляется вместе с платой управления Arduino, которая содержит все необходимые библиотеки для написания управляющий команд. Внешний вид датчика и платы управления представлены на рисунках 8.17 и 8.18 соответственно.



Рисунок 8.17 – Внешний вид датчика Adafruit 9-DOF IMU Breakout производства Adafruit Industries



Рисунок 8.18 – Внешний вид платы управления Arduino производства Adafruit Industries

Поскольку система построена на ранее рассмотренных датчиках приводить технические характеристики не будем. Отметим, что производитель создал готовое техническое решение с программным обеспечением, платой измерительной системы и платой управления.

Таким образом, датчики положения (гироскопы и акселерометры) также, как и датчики усилия, представлены двумя типами. Это миниатюрные датчики и законченные измерительные устройства. Следуя логике выбора датчиков усилия целесообразно выбрать измерительные системы Adafruit 9-DOF IMU производства Adafruit Industries или UM7 производства CH Robotics. В такие устройства заложена многофункциональность. Это позволит удовлетворить требованиям технического задания на последующих этапах, упросить задачу программирования и сопряжения данных.

8.3 Анализ и выбор джойстиков для управления макетом роботизированной системы

Одним из ключевых требований к системе управления манипулятором является то, что управление манипулятором должно осуществляться в автоматическом и полуавтоматическом режимах работы. Поэтому для реализации полуавтоматического режима работы необходимо наличие специальной управляющей программы и джойстиков управления. Также управление в полуавтоматическом режиме с помощью джойстика необходимо применить и к устройству перемещения игл.

В ходе анализа представленных на рынке джойстиков управления, удовлетворяющих техническим требованиям были найдены следующие варианты:

- Джойстик управления series 891 производителя Megatron;
- Джойстик управления RS desktop производителя Megatron;
- Джойстик управления series C90JA производителя SAKAE TSUSHIN KOGYO Co., LTD;
- Джойстик управления Extreme 3D Pro производителя Logitech;

- Тактильные устройства Haptic Device производителя Force Dimension.

- Рассмотрим каждый вариант более подробно.

1 Анализ технических характеристик джойстика series 891 производства Megatron

Джойстик представляет собой рукоятку, на которой расположены переключатели и кнопки управления. Внешний вид джойстика представлен на рисунке 8.19. Джойстик построен на базе датчиков Холла и потенциометров.



Рисунок 8.19 – Внешний вид джойстика series 891 производства Megatron

Данный джойстик имеет следующие технические характеристики, представленные в таблице 27.

Таблица №27 – Технические характеристики джойстика series 891

Джойстик series 891	
Параметры	Значения
Поворот по осям X и Y соответственно	$\pm 22^\circ \pm 22^\circ$
Поворот по осям Z1 и Z2 соответственно	$15^\circ \pm 4^\circ$
Вибрация	10g
Длина проводов	300 мм
Точность центрирования по осям X и Y	$\pm 3\%$
Рабочая сила	От 2 до 12 Н
Рабочий цикл	10 млн операций

Рабочая температура	От -20 до +60 С
Вес	950 гр
Сопротивление изоляции	>1000 МОм
Электрическая прочность	1 минута при 1000 VAC
Переключатели SW1 SW2 SW3 SW6	
Сопротивление изоляции	>1000 МОм
Рабочий цикл	500 тыс операций
Электрическая прочность	1 минута при 1000 VAC
Переключатели SW4 SW5 подсвечиваемые	
Сопротивление изоляции	>200 МОм
Рабочий цикл	10 тыс операций
Электрическая прочность	1 минута при 1000 VAC
Триггер SW7	
Сопротивление изоляции	>100 МОм
Рабочий цикл	100 тыс операций
Электрическая прочность	1 минута при 600 VAC
Потенциометр X Y	
Сопротивление	10 КОм±15%
Электрическое вращение	44° ±5°
Рабочий цикл	5 млн операций
Точность центрирования по осям X Y	1,5%
Потенциометр Z1 Z2	
Сопротивление	10 КОм±15%
Электрическое вращение	30° ±5°
Рабочий цикл	2 млн операций
Точность центрирования по осям X Y	3%
Датчик Холла	
Напряжение питания	5 В±10%

Ток	6 мА
Выходное напряжение	От 0,5 до 4,5 В
Электрическая прочность	1 минута при 250 ВАС
Сопротивление изоляции	>100 МОм
Рабочий цикл	5 млн операций

Технические характеристики джойстика удовлетворяют требованиям технического задания. Данный джойстик может быть использован для управления в полуавтоматическом режиме роботом-манипулятором для позиционирования устройства перемещения игл перед операцией. Конструктивно датчик представлен на рисунке 8.20.

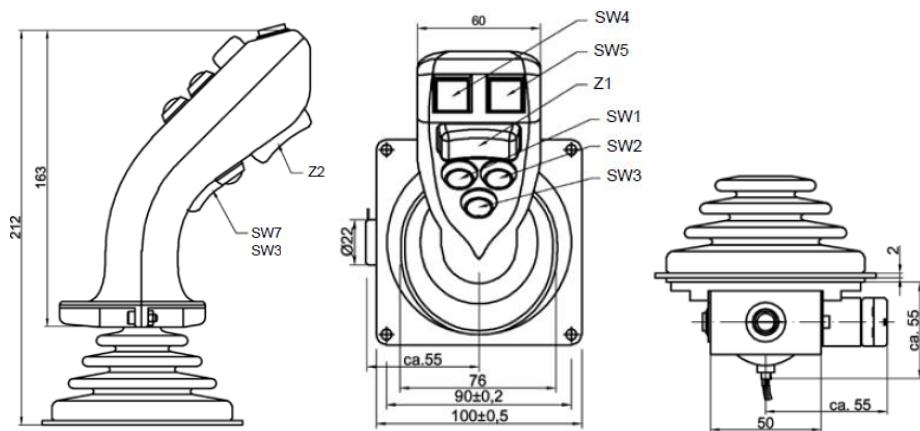


Рисунок 8.20 – Конструктивный вид джойстика series 891 производства Megatron

2 Анализ технических характеристик джойстика RS desktop производства Megatron

Джойстик разработан специально для профессионального использования в помещении. Эргономичный дизайн джойстика позволяет использовать его как для левой так и для правой руки одинаково. Джойстик специально разрабатывался как средство высокоточного ручного управления для медицинских систем и устройств. Джойстик построен на базе датчиков Холла. Внешний вид джойстика представлен на рисунке 8.21.



Рисунок 8.21 – Внешний вид джойстика RS desktop производства
Megatron

Рассмотрим его технические характеристики приведённые в таблице 28.

Таблица №28 – Технические характеристики джойстика RS desktop

Джойстик RS desktop	
Параметры	Значения
Поворот по осям X и Y	±18°
Поворот по оси Z	±30°
Напряжение питания	5 В (USB интерфейс)
Ток	100 мА
Поддерживаемые протоколы	USB HID 1.1 game controller Direct X (Gaming Control) Joystick: 3 HID axes Pushbuttons: 6 HID pushbuttons
Степень защиты	Только для использования в помещениях
Рабочая температура	От – 25 до 70 С
Материал	Ударопрочный ABS, нержавеющая сталь
Вес	25 гр
Интерфейс	USB

Конструктивно джойстик представлен на рисунке 8.22.

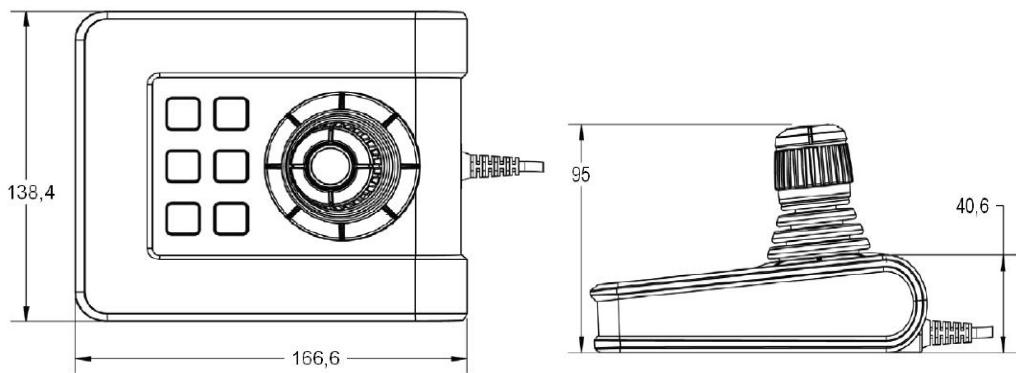


Рисунок 8.22 – Конструктивный вид джойстика RS desktop производства Megatron

Представленный джойстик может быть применён для управления устройством перемещения игл, поскольку обеспечивает высокоточное управление и разрабатывался как специализированное техническое решения для медицинских систем и устройств.

3 Анализ технических характеристик джойстика series C90JA производства SAKAE TSUSHIN KOGYO Co., LTD

Многофункциональный джойстик управления на базе потенциометров с проводящим пластиковым резистивным элементом. Внешний вид джойстика представлен на рисунке 8.23. Джойстик является аналогом модели series 891 и предназначен для управления манипулятором. Рассмотрим его технические характеристики в таблице 29.



Рисунок 8.23 – Внешний вид джойстика C90JA производства SAKAE TSUSHIN KOGYO Co., LTD

Таблица №29 – Технические характеристики джойстика C90JA

Джойстик C90JA	
Параметры	Значения
Сопротивление	10 КОм±15%
Электрическое вращение	44° ±5°
Точность центрирования	1,5 %
Рабочий цикл	5 млн операций
Переключатели SW1 SW2 SW3 SW6	
Сопротивление изоляции	>1000 МОм
Рабочий цикл	500 тыс операций
Электрическая прочность	1 минута при 1000 VAC
Переключатели SW4 SW5	
Сопротивление изоляции	>200 МОм
Рабочий цикл	10 тыс операций
Электрическая прочность	1 минута при 1000 VAC
Триггер SW7	
Сопротивление изоляции	>100 Мом
Рабочий цикл	100 тыс операций
Электрическая прочность	1 минута при 600 VAC

По своим характеристикам джойстик C90JA отличается от джойстика series 891 точностью центрирования - она в два раза выше, и электрическим вращением – оно на 14 градусов больше. Конструктивное исполнение джойстика представлено на рисунке 8.24.

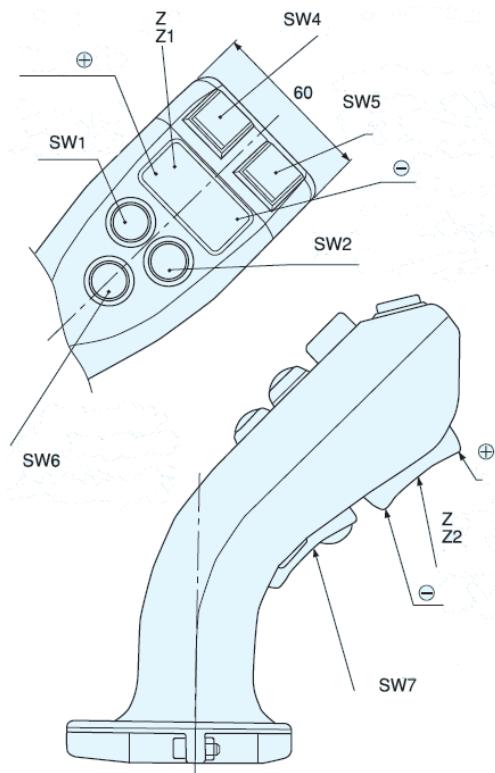


Рисунок 8.24 – Конструктивный вид джойстика C90JA производства SAKAE TSUSHIN KOGYO Co., LTD

Джойстик удовлетворяет техническим требованиям для управления роботом-манипулятором.

4 Анализ технических характеристик джойстика Extreme 3D Pro производства Logitech

Джойстик разработан и представлен как игровое устройство. Однако, довольно часто именно такие джойстики используют для управления роботом манипулятором для проведения экспериментальных исследований. Джойстик оснащён обратной связью по усилию. Корпус джойстика имеет два блока. Один блок в виде основания джойстика с кнопками управления, второй блок рычаг с кнопками и переключателями. Внешний вид джойстика представлен на рисунке 8.25.



Рисунок 8.25 – Внешний вид джойстика Extreme 3D Pro производства Logitech

Рассмотрим технические характеристики джойстика в таблице 30.

Таблица №30 – Технические характеристики джойстика Extreme 3D Pro

Джойстик Extreme 3D Pro	
Параметры	Значения
Интерфейс	USB 2.0
Количество осей	4
Количество переключателей вида	1
Количество программируемых кнопок	12
Напряжение питания	5 В

Данный джойстик удобен своей интегрированностью в пользовательский компьютер.

5 Анализ технических характеристик тактильных устройство Haptic Device производства Force Dimension

Одним из передовых решений в области управления медицинскими роботами-манипуляторами являются очувствленные приводы или тактильные устройства. Они представляют собой сложную механическую систему на основе дельта манипулятора. Для передачи усилий используется специальная параллельная механическая конструкция благодаря которой

расположение системы управления может располагаться практически в любом месте рабочей зоны. Внешний вид таких устройств представлен на рисунке 8.26.



Рисунок 8.26 – Внешний вид тактильного устройства delta 3 haptic device производства Force Dimension

Компания Force Dimension имеет целую линейку таких устройств. Рассмотрим технические характеристики на примере одного из них в таблице 31.

Таблица №31–Технические характеристики чувствительного устройства delta 3 haptic device

Джойстик delta 3 haptic device	
Параметры	Значения
Рабочая зона	400*260мм
Рабочее усилие	20 Н
Разрешающая способность	0,02 мм
Интерфейс	USB 2.0
Частота	От 4 КГц
Напряжение питания	110-240 В
Программное обеспечение	Windows XP / Vista / 7 / 8 Windows CE 7

	Linux kernel 2.6 / 3.x QNX 6.5 / 6.6 WindRiver VxWorks 6.3 / 6.8 / 6.9	Apple OS X
Принцип действия	Кинематическая схема на основе компенсации силы тяжести	
Калибровка	Автоматическая	
Применение	Правостороннее и левостороннее	

Рассмотренное устройство удовлетворяет техническим требованиям и может применяться для решения задачи ручного управления роботом-манипулятором. Рассмотренное устройство delta 3 haptic device является инновационным и на рынке практически не представлено за исключением нескольких компаний. Джойстик отличается своей дороговизной, а поскольку данный этап не предусматривает применение такого специализированного технического устройства остановим свой выбор на джойстике управления промышленного типа RS desktop производства Megatron, т.к. данный джойстик в полной мере удовлетворяет техническим требованиям и имеет ряд отличительных особенностей, выделяющих его на фоне рассмотренных джойстиков. Во-первых джойстик разработан как специализированное техническое решение для прецизионных медицинских систем. Это компактный джойстик с дополнительным набором кнопок для управления как роботом манипулятором, так и устройством ввода игл. Передача управляющих команд осуществляется через интерфейс USB 2.0.

8.4 Анализ технических характеристик двигателей производства Harmonic Drive

Одним из мировых лидеров по производству сервоприводов и двигателей для роботов является компания Harmonic Drive. Компания производит двигатели для таких мировых лидеров по проектированию и производству промышленных роботов как: KUKA, Reis, Herrmann

Automation, Pal Robotics и другие. Также компания разрабатывает двигатели для хирургических роботов, где требуется высокая повторяемость, плавность движения, надёжность. Примером служит робот SOLOASSIST от компании AKTORmed GmbH. Согласно требованиям технического задания робот-манипулятор должен обладать следующими характеристиками:

- погрешность позиционирования хирургического инструмента в зоне не более 0,5 мм;
- скорость перемещения инструмента не более 30 мм/с;
- число степеней подвижности не менее 6;
- номинальную грузоподъёмность манипулятора в динамическом режиме – не менее 1 кг;

Также, приведём таблицу 32 из отчёта «Разработка технических требований к компонентам макета роботизированной системы».

Таблица 32 Список требований макета роботизированной системы к роботу-манипулятору

Робот-манипулятор	
Требования	Значения
Способ крепления	Фиксированное положение манипулятора на стойке, штанге
Масса манипулятора	<20,0 кг
Номинальная грузоподъёмность робота	<5,0 кг
Число степеней подвижности	6
Точность позиционирования схвата по отношению к зафиксированному основанию робота – базе	<0,1 мм
Рабочая зона	<700 мм в диаметре
Протокол обмена данными	TCP/IP Ethernet, Modbus TCP, USB 2.0

Опыт эксплуатации сервоприводов компании Harmonic Drive позволяет с уверенностью сказать, что предлагаемые технические решения в сфере медицинской робототехники полностью удовлетворяют требованиям технического задания. Рассмотрим модельный ряд.

Двигатели серии HFUS позиционируются как оптимальное техническое решение для применения в медицинской робототехнике. HFUS-2UH имеет следующие особенности:

- оптимальное конструктивное решение с точки зрения применяемых материалов, разработанных деталей и их компоновки;
- двигатель просто интегрируется в любую систему;
- двигатель имеет высокую производительность за счёт встроенного подшипника с повышенной надёжностью;
- имеется большой полый вал;

Рассмотрим технические характеристики, представленные в таблице 33.

Таблица 33 Технические характеристики двигателя HFUS-2UH производителя Harmonic Drive

Двигатель HFUS-2UH	
Параметры	Значения
Типоразмер	От 14 до 58
Передаточное число	От 30 до 160
Усилие	От 75 до 216 Нм
Пиковое усилие	От 200 до 686 Нм
Момент инерции	2,85 кг/*м^2
Вес	4,2 кг
Максимальный диаметр полого вала	36 мм
Точность передачи	<1,5°
Повторяемость	<±0,1 °
Жёсткость	От 49 до 120 Нм/рад
Рабочая температура	От -40 до +90
Внешний диаметр	147 мм.

Двигатель серии HFUS-2SH отличается только массой в 3,1 кг и размером внешнего диаметра в 142 мм. Двигатель серии HFUS-2SO

отличается меньшим моментом инерции в 1,69 кг/*м² и весом в 2,1 кг. Внешний вид двигателей представлен на рисунках 25,26 и 27 соответственно.



Рисунок 8.27 – Внешний вид двигателя HFUS-2UH производства
Harmonic Drive



Рисунок 8.28 – Внешний вид двигателя HFUS-2SH производства
Harmonic Drive



Рисунок 8.29 – Внешний вид двигателя HFUS-2SO производства
Harmonic Drive

Представленные двигатели, благодаря широкому диапазону передаточных отношений, усилий и типоразмеру могут быть установлены на все исполнительные узлы.

Общая масса приводов при 6 степенях подвижности робота не превышает 15 кг, что удовлетворяет техническим требованиям на манипулятор, повторяемость и точность позиционирования также удовлетворяют требованиям технического задания. Приводы компании Harmonic Drive целесообразно использовать для создания робот-манипулятора и макета роботизированной системы.

Проведённый анализ компонентной базы для макета роботизированной системы позволяет сделать выбор по каждому узлу макета роботизированной системы. Весь перечень компонентов представлен в сводной таблице №34.

Таблица 34 Сводная таблица компонентов макета роботизированной системы

Макет роботизированной системы		
Компонент	Название	Количество
Датчик усилия	UM7 CH Robotics	2 шт.
	Adafruit 9-DOF IMU Breakout Adafruit Industries	
Датчик положения	UM7 CH Robotics	1 шт.
Джойстик	RS desktop Megatron	1 шт.
	delta 3 Force Dimension	1 шт.
Приводы манипулятора	HFUS-2UH Harmonic Drive	6 шт.

Предложенный анализ и выбор компонентной базы макета роботизированной системы может подвергаться корректировке в зависимости от многочисленных факторов, связанных с наличием данных продуктов на рынке.

9 Разработка технических требований к системе сопряжения макетом роботизированной системы по данным УЗ и МРТ сканеров.

При разработке технических требований к системе сопряжения важно учитывать все взаимосвязи между компонентами и узлами комплекса. Для наглядного представления рассмотрим такую систему на рисунке 9.1

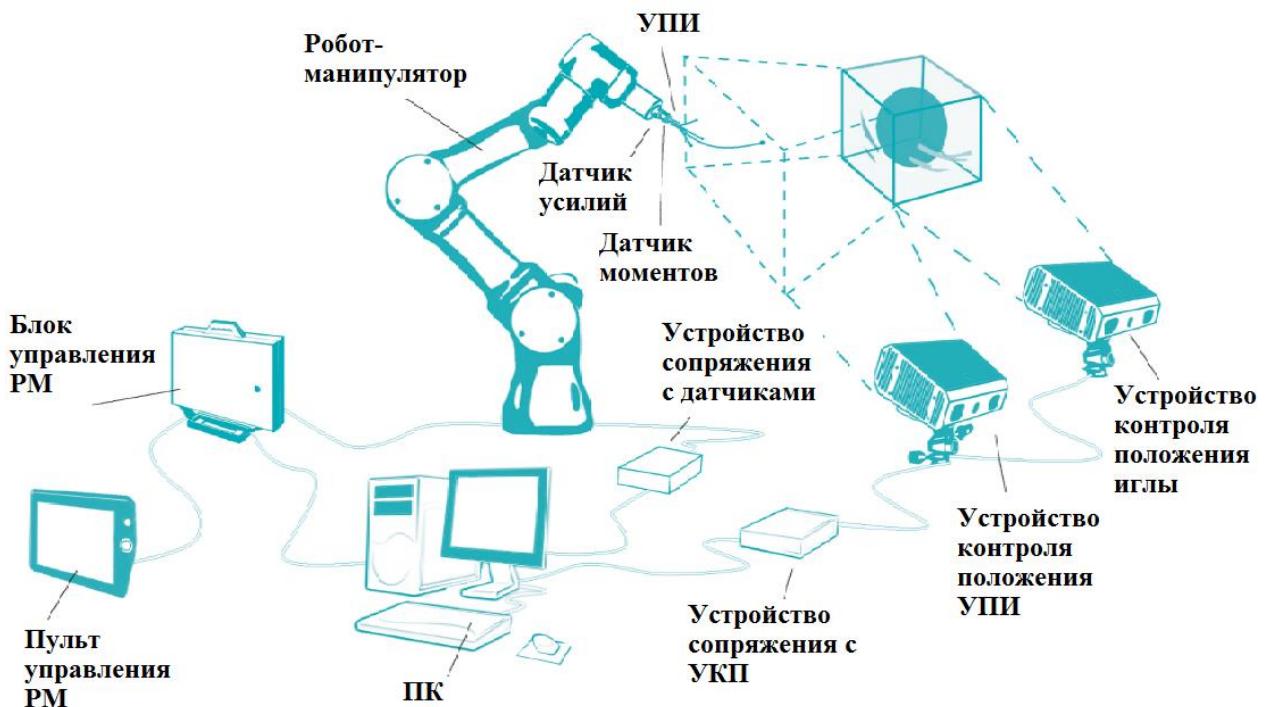


Рисунок 9.1 – Система сопряжения макета роботизированной системы

На рисунке в роли системы сопряжения выступают отдельные устройства, сопрягающие между собой отдельные узлы комплекса. Структурно система сопряжения может делиться на составные части, обслуживающие каждая свой блок. По такому же принципу можно разбить и сам робототехнический комплекс. К исполнительной части можно отнести робота-манипулятора, устройство перемещения игл, пульт управления; к системе визуализации можно отнести УЗ сканер, монитор, визуализирующий информацию со сканера; к измерительной системе можно отнести все датчики; к управляющей системе компьютер. Система предстаёт сложным техническим комплексом решающим задачу доставки радионуклидных микроисточников. Приведём описание требований к системе сопряжения.

9.1 Разработка технических требований к системе сопряжения

В ходе работы такой системы ей накапливается огромное количество разнородной информации, задействованной на всех уровнях. Кроме алгоритмов обработки этой информации, важно обеспечить обмен данными между всеми узлами и компонентами системы. Сложность данной задачи заключается ещё и в том, что характер сигналов, способ их передачи и обработки у каждого устройства свой. Следствием этого является необходимость иметь систему, которая будет аккумулировать, формировать и передавать информацию, собранную со всех устройств в управляющий компьютер. Отсюда вытекает первое важное требование к системе сопряжения:

- способность получать информацию по различным типам интерфейсов от устройств разного порядка и назначения.

Поскольку весь процесс доставки и закладки микроисточников по ходу операции производится в режиме реального времени, система должна успевать обрабатывать поступающую информацию и своевременно передавать её в управляющий компьютер. Отсюда вытекает ещё одно важное требование к системе сопряжения:

- система должна обладать высоким быстродействием, а следовательно и скоростью обработки и передачи информации.

Являясь узловым элементом передачи данных, должна быть гарантирована безопасность такой передачи. Отсюда вытекает требование надёжности системы:

- система должна обеспечивать надёжную, бесперебойную работу как на физическом уровне, так и на уровне обмена данными в зависимости от используемых протоколов обмена.

Для удобства сведём полученные данные в таблицу 35.

Таблица 35 – Технические требования к системе сопряжения

Параметры	Значения
Приём, обработка и передача информации с различных интерфейсов	RS-485, RS-232, I2c, USB 2.0, Ethernet, TCP/IP, ModBus, ModBus RTU
Быстродействие системы	От 10 до 50 мс
Степень защиты	IP67

Для детализации разработанных требований необходимо провести анализ существующих технических решений, который представлен в следующем разделе.

10 Анализ и выбор компонентной базы системы сопряжения

При анализе и выборе компонентной базы системы сопряжения роботизированной системы мы руководствовались основными техническими требованиями, предъявляемыми к экспериментальному стенду, согласно техническому заданию, а также дополнительными техническими требованиями, которые были разработаны и представлены в отчёте «Разработка технических требований к компонентам экспериментального стенда для проведения исследований». Ниже представим список требований технического задания на экспериментальный стенд, куда входит система сопряжения:

Согласно техническому заданию в состав экспериментального стенда входят:

- система визуализации и контроля для визуализации траектории движения игл внутри тела человека и измерения точного положения введённых микроисточников;
- несущая рама для крепления фантома тела человека, макета роботизированной системы и устройств системы визуализации и контроля.

Требования, предъявляемые к экспериментальному стенду:

- создаваемый экспериментальный стенд должен обеспечивать визуализацию траектории движения игл внутри тела человека и измерение точного местоположения введенных микроисточников с помощью УЗ или МРТ датчиков;
- погрешность измерения местоположения микроисточников не более 0,1 мм;
- визуализация траектории движения игл в режиме реального времени
- разрабатываемое ПО должно осуществлять оперативный сбор данных, их обработку в режиме реального времени, визуализацию на экране ПК, необходимое взаимодействие с оператором, выработку команд управления частей макета роботизированной системы.

Компоновка экспериментального стенда роботизированной системы представлена на рисунке 10.1.

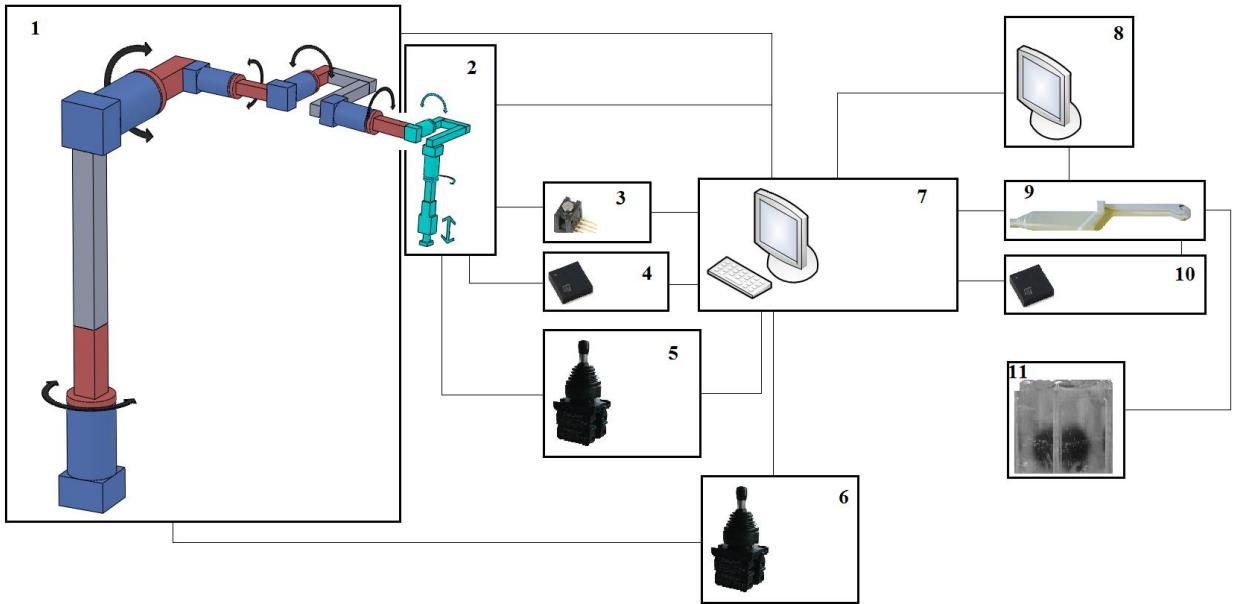


Рисунок 10.1 – Компоновка экспериментального стенда роботизированной системы, 1 – РМ, 2 – УПИ, 3 – датчик усилия, 4 – датчик положения, 5 – джойстик управления УПИ, 6 – джойстик управления РМ, 7 – ПК, 8 – монитор УЗИ, 9 – сканер УЗИ, 10 – акселерометр, 11 - ФО

Робот-манипулятор, включающий в себя, измерительную систему по усилию и положению, джойстики управления и устройство перемещения игл на выходе имеет определённое количество интерфейсов. Аналогично обстоит ситуация с системой визуализации. Для организации корректной работы всей системы в целом необходимо предусмотреть систему сопряжения, которая бы позволяла обеспечить качественную взаимосвязь в режиме реального времени между роботом-манипулятором, системой визуализации и пользовательским компьютером. Такая система должна обладать расширенным набором функций приёма-передачи информации в виде сигналов обратной связи, информационных сигналов и управляющих сигналов. Система должна иметь ядро в виде программируемого логического контроллера с соответствующими устройствами ввода-вывода. Схематично общий вид стенда с такой системой представлен на рисунке 10.2.

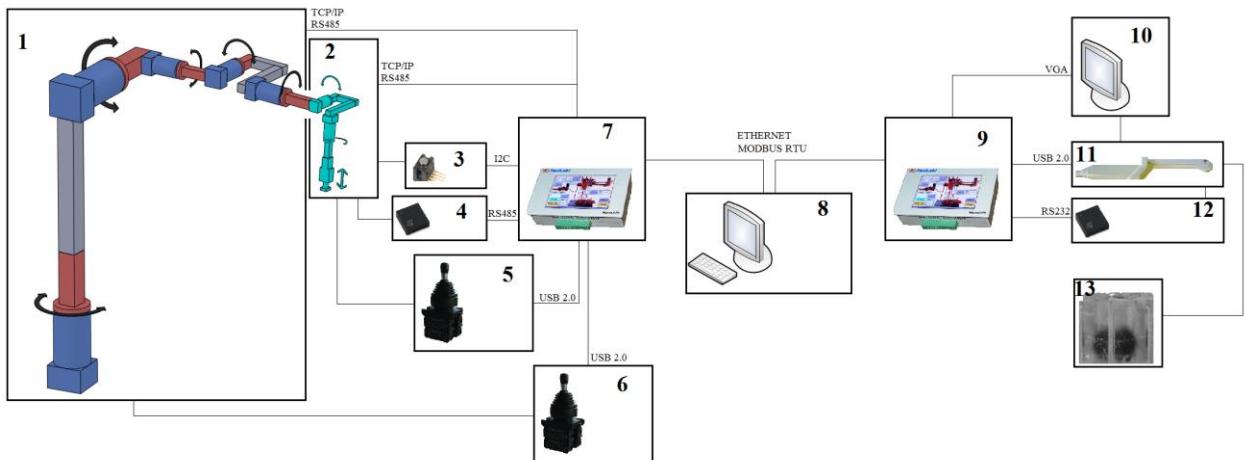


Рисунок 10.2 – Система сопряжения, 1 – РМ, 2 – УПИ, 3 – датчик усилия, 4 – датчик положения, 5 – джойстик управления УПИ, 6 – джойстик управления УПИ, 7 – Устройство сопряжения, 8 – ПК, 9 – устройство сопряжения, 10- монитор УЗИ, - 11 – сканер УЗИ, 12 – акселерометр, 13 - ФО

10.1 Анализ и выбор компонентной базы системы сопряжения

Основным компонентом системы сопряжения выступает блок управления интерфейсами, который представлен на рисунке 2. Блоком управления интерфейсами может являться промышленный логический контроллер, который имеет необходимое количество входов и выходов, возможность подключения измерительных устройств с различными интерфейсами (USB 2.0, RS485, RS232, I2C Modbus RTU, TCP/IP, Dcon и др.)

Промышленные логические контроллеры в основном предназначены для решения задач автоматизации производства, где требуется распределённая система управления и наличие иерархической структуры управления. В нашем случае на этапе макетирования требуется устройство ввода/вывода, которое бы обеспечивало автоматизированный сбор всей информации в режиме реального времени с исполнительных и периферийных устройств, с системы визуализации и выдавало бы полученную информацию на управляющий компьютер для последующей обработки и выдачи управляющих команд. Таким устройством может являться модуль ввода/вывода. Для эффективной работы таких устройств на

пользовательском компьютере устанавливается SCADA-система. С помощью этой системы модуль программируется под решение конкретных задач. На рынке промышленных логических контроллеров и модулей ввода/вывода представлено большое количество компаний-производителей, как отечественных, так и импортных, которые предлагают стандартные и специализированные решения для различных отраслей. В таблице 36 представлены отечественные и импортные производители контроллеров и устройств ввода/вывода.

Таблица 36 – Производители промышленных логических контроллеров

Производители ПЛК и модулей ввода/вывода	
Отечественные	Импортные
Segnetics	Siemens
Trei	Schneider Electric
Овен	Omron
Нил АП	Allen Bradley
Текон	

Представленные компании разрабатывают и производят логические контроллеры для построения распределенных автоматических и автоматизированных систем измерения, контроля, регулирования, диагностики и управления производственными процессами, технологическими линиями и агрегатами, а также для автоматизации различных инженерных систем, таких, как вентиляция, отопление, водоподготовка, для взрывоопасных производств и систем противоаварийных блокировок. Поэтому проводить анализ и выбор промышленных логических контроллеров под наши задачи не имеет смысла.

Для достижения требований технического задания будем использовать модули ввода/вывода. Модули аналогового и дискретного ввода-вывода обеспечивают аналого-цифровое, цифро-аналоговое преобразование информации и ввод-вывод аналоговых и дискретных сигналов, счет

импульсов, измерение частоты, преобразование интерфейсов и другие функции, необходимые для построения систем управления.

Модули могут быть использованы, например, для решения следующих задач:

- компьютерное управление исполнительными механизмами (печами, электродвигателями, клапанами, задвижками, фрамугами и т.п.) с обратной связью и без;
- автоматизация стендов для приемо-сдаточных и других испытаний продукции;
- научные исследования и разработки, запись в компьютер и отображение медленно меняющихся физических процессов.

Анализ технических характеристик устройства ввода/вывода NL-8AI-M производства НИЛ АП

Модуль ввода/вывода NL-8 AI-M позиционируется как универсальное устройство аналогового ввода/вывода. Модули характеризуются следующими основными свойствами:

- модули NL-8AI позволяют устанавливать для каждого канала свой диапазон измерений или тип датчиков (в режиме ASCII);
- температурным диапазоном работоспособности от -40 до +70 °C;
- имеют 11 видов защит от: неправильного подключения полярности источника питания, превышения напряжения питания, перенапряжения по входу, короткого замыкания по выходу, перегрузки по току нагрузки, перенапряжения по выходу, перегрева выходных каскадов;
- электростатических разрядов по выходу, входу и порту RS-485;
- выбросов напряжения при индуктивной нагрузке;
- перегрева выходных каскадов порта RS-485;
- короткого замыкания клемм порта RS-485;
- аппаратная диагностика к.з. и обрыва датчиков;
- имеют возможность "горячей замены", т. е. без предварительного отключения питания;

- двойной сторожевой таймер выполняет рестарт устройства в случае его "зависания" и провалов питания, а также переводит выходы в безопасные состояния при "зависании" управляющего компьютера;
- имеют групповую изоляцию входов и групповую изоляцию выходов с тестовым напряжением изоляции 2500 В. Постоянно действующее напряжение, приложенное к изоляции, не может быть более 300В (среднеквадратическое значение);
- входы имеют общую гальваническую изоляцию от части модуля, с соединенной с источником питания и портом RS-485. Изоляция обеспечивает защиту модуля и соединенного с ним оборудования от высокого синфазного напряжения, которое допустимо на входных клеммах. Изоляция защищает также модуль от разности потенциалов между "землей" источника сигнала и приемника, которая может возникнуть при наличии недалеко расположенного мощного оборудования;
- используют любое напряжение питания в диапазоне от 10 до 30 В;
- разрешающая способность 16 бит;
- программно переключаемые диапазоны входных сигналов: ± 15 мВ, ± 50 мВ, ± 100 мВ, ± 500 мВ, ± 1 В, $\pm 2,5$ В, ± 20 мА;
- три типа формата данных: инженерный, шестнадцатеричный, проценты от шкалы. Тип формата выбирается программно;
- скорость обмена через порт RS-485, бит/с: 1200 и менее; 2400, 4800, 9600; 19200, 38400, 57600, 115200. Выбирается программно;
- модули имеют встроенный контроллер и благодаря наличию каналов дискретного вывода могут выполнять функцию автономного локального релейного или ПИД регулирования;
- встроенное ЭППЗУ позволяет хранить настройки модуля при выключенном питании;
- программное обеспечение: OPC сервер;
- степень защиты от воздействий окружающей среды - IP20;
- наработка до отказа не менее 100000 час.

Внешний вид модуля представлен на рисунке 3.



Рисунок 10.2 – Внешний вид модуля ввода/вывода NL-8 AI-M производства НИЛ АП.

Погрешность измерений напряжения, тока, сопротивления и температуры складывается из основной погрешности и дополнительной. Основная погрешность определяется в нормальных условиях эксплуатации. Дополнительная погрешность появляется, когда прибор используется в условиях, отличных от нормальных. Дополнительная погрешность алгебраически складывается с основной. Основная погрешность измерений дана в таблице 37 в виде относительной погрешности, приведенной к верхней границе динамического диапазона. Для диапазонов с несимметричными пределами погрешность нормирована на ширину диапазона.

Таблица 37 – Метрологические характеристики модуля NL-8 AI-M

Диапазон измерений	Пределы допускаемой основной погрешности	Пределы допускаемой дополнительной погрешности, вызванной изменением температуры на 10С
±10 В; ±5 В; ±1 В; ±500 мВ; ±150 мВ	±0,1%	±0,05%
±20 мА	±0,1%	±0,05%

Технические параметры порта ввода/вывода RS-485 представлены в таблице 38.

Таблица 38 – Технические параметры модуля ввода/вывода NL-8 AI-M

Параметры	Значения
Уровень логического нуля	От – 0,2 до +0,2 В
Гистерезис по входу	70 мВ
Входное сопротивление	12 кОм
Входной ток	1 мА
Время измерения	0,2*N (N-число активных каналов)
Входная ёмкость	1 нФ
Полоса пропускания	13,1 Гц
Период опроса входа	0,1 с
Потребляемая мощность	0,6 Вт
Зашита от перегрузки по напряжению до	±100 В

Сигналы с входа модуля подаются на вход АЦП через аналоговый коммутатор (мультплексор) и преобразуются в цифровой 24-разрядный код. АЦП имеет встроенный цифровой фильтр и усилитель сцифроуправляемым коэффициентом усиления. Это позволяет программно изменять полосу пропускания модуля и диапазон входных напряжений. Число разрядов АЦП уменьшается при увеличении усиления. Поэтому для работы с термопарами число разрядов было уменьшено до 16, что позволило получить максимальное усиление. Внешние управляющие команды посылаются в модуль через порт RS-485.

Структурная схема NL-8 AI-M представлена на рисунке 10.3.

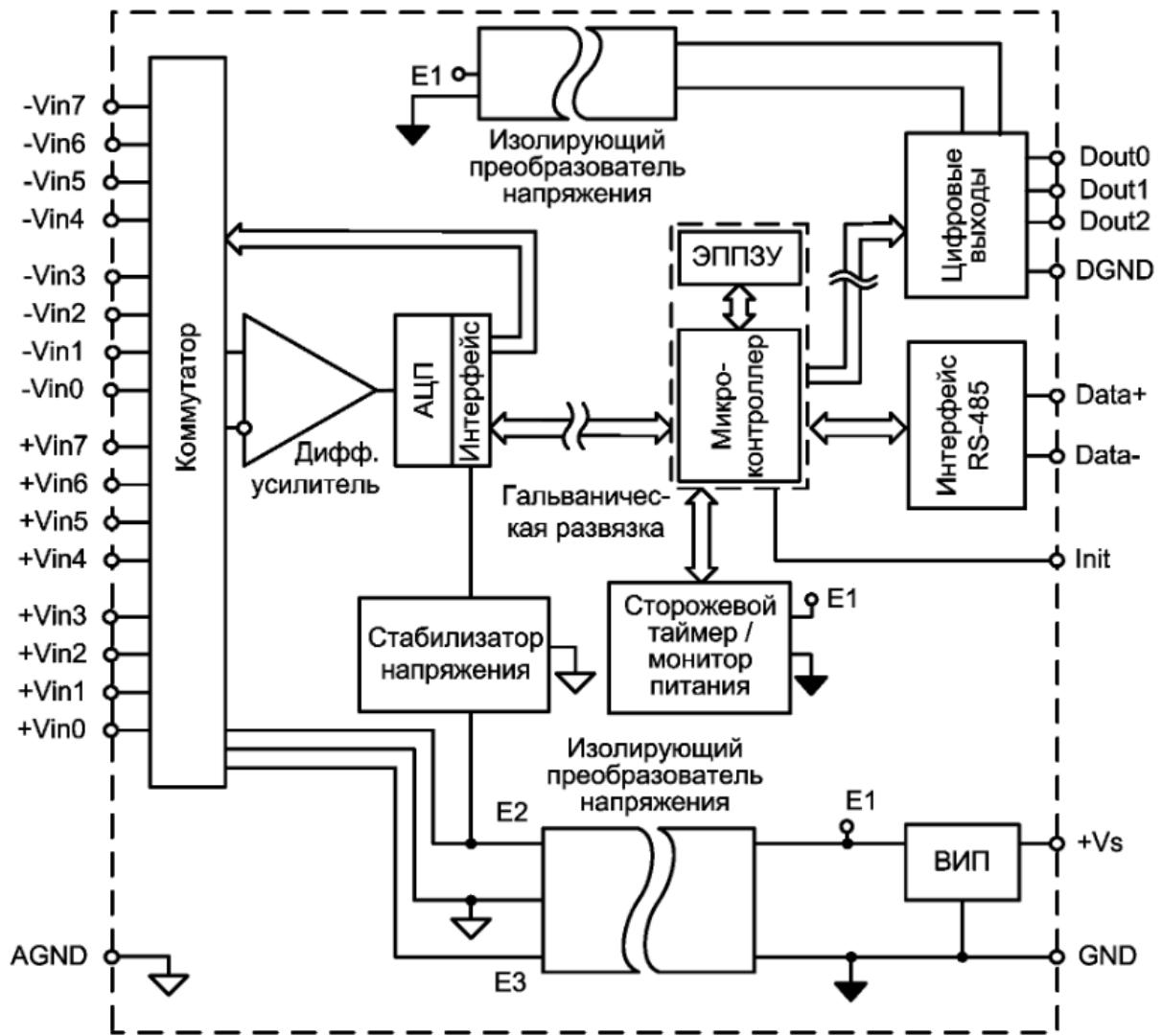


Рисунок 10.3 – Структурная схема NL-8 AI-M.

Для работы с модулями серии NL необходимо иметь следующие компоненты:

- сам модуль;
 - управляющий компьютер, который может выводить ASCII коды через порт RS-232 или RS-485 (например, IBM PC совместимый);
 - источник питания напряжением от 10 до 30 В, мощностью несколько Ватт;
 - конвертер порта RS-232 в RS-485 (если компьютер не имеет порта RS-485);

Анализ технических характеристик устройства ввода/вывода M920L производства Trei

Терминал удалённого ввода/вывода данных M920L предназначен для оперативного отображения, корректировки и ввода различных параметров, выдачи общей информации в графическом и текстовом виде. M920L позиционируется как техническое решение для локальных систем, со стандартным набором интерфейсных средств (пользовательский компьютер, монитор и клавиатура). Обмен информацией осуществляется через полудуплексный интерфейс RS-422. Внешний вид M920L представлен на рисунке 10.4.

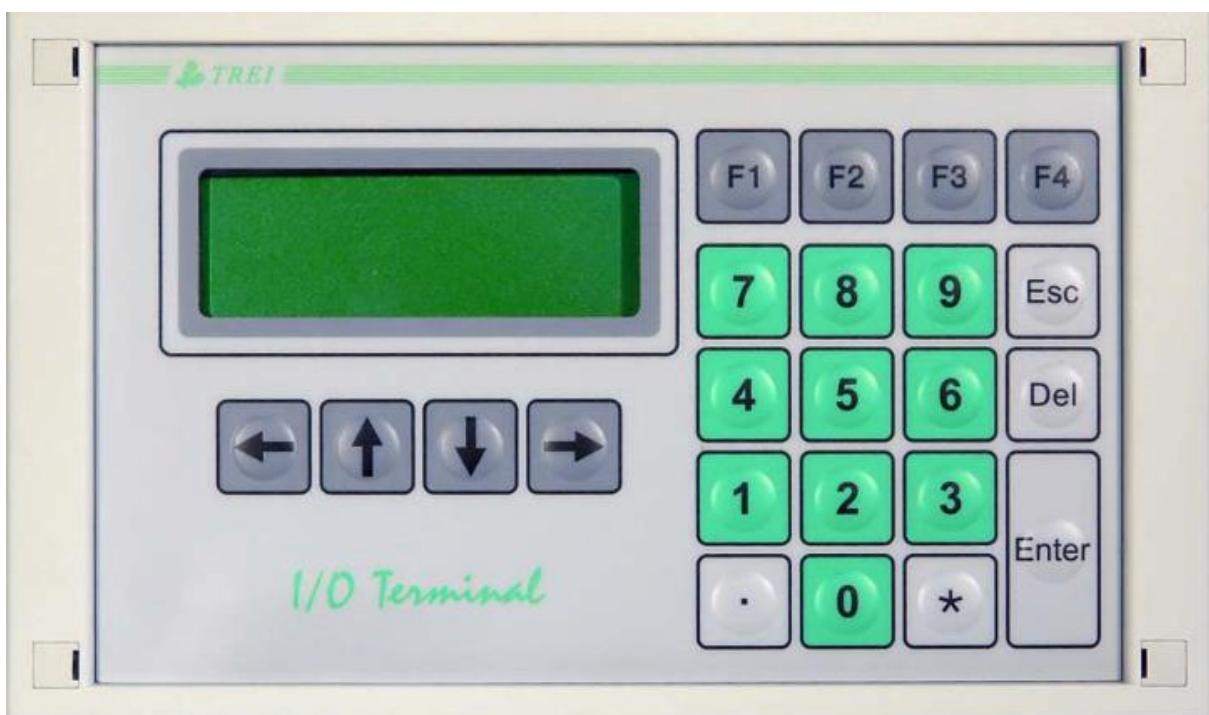


Рисунок 10.5 – Внешний вид модуля ввода/вывода M920L производства Trei.

Технические характеристики устройства представлены в таблице 39.

Таблица 39 – Технические параметры модуля ввода/вывода M920L

Параметры	Значения
Интерфейс	RS-232, RS-422/RS-485, полу- и полнодуплексный
Формат данных	8N1
Скорость обмена бод по	

RS-232	От 1200 до 230400
RS-422	От 1200 до 921600
RS-485	От 1200 до 921600
Кодовые таблицы	CP866 (DOS) WIN1251, KOI-8r
Питание	От 10 до 30 В постоянного тока
Потребление	
LCD (без подсветки)	30 мА
LCD (с подсветкой)	350 мА
VFD	450 мА
Полоса пропускания	13,1 Гц
Период опроса входа	0,1 с
Потребляемая мощность	0,6 Вт
Защита от перегрузки по напряжению до	±100 В

В зависимости от конфигурации системы модуль может быть установлен как в непосредственной близости от контроллера, так и удалённо. Являясь исполнительным устройством, терминал не содержит собственной технологической программы. Вся необходимая функциональность интерфейса задаётся технологической программой интеллектуального модуля или любой другой системы управления.

Для каждого конкретного применения с помощью пакета Unimond Pro Solution разрабатывается технологическая программа, которая загружается в интеллектуальный модуль и следуя заданному алгоритму осуществляет визуализацию параметров системы. Вывод информации осуществляется на алфавитно-цифровой жидкокристаллический или вакуумно-флуоресцентный дисплей. Ввод информации осуществляется с помощью клавиатуры.

Отличительной особенностью М920L является наличие дисплея и клавиатуры.

Анализ технических характеристик устройства ввода/вывода МВА8 производства Овен

Восьмиканальный универсальный измерительный модуль ввода для распределенных систем управления в сети RS-485. Основные особенности модуля:

- восемь универсальны входов для подключения широкого спектра датчиков для измерения различных величин;
- цифровая фильтрация и коррекция входных сигналов, масштабирование показаний датчиков с унифицированным входным сигналом;
- передача измеренных значений по интерфейсу RS-485;
- поддержка распространённых протоколов (Modbus RTU, Modbus ASCII, DCON).

Внешний вид устройства представлен на рисунке 10.6.



Рисунок 10.6 – Внешний вид модуля ввода/вывода МВА8 производства Овен.

Установленный в модуль интерфейс RS-485 позволяет конфигурировать прибор на пользовательском компьютере, а также передавать в сеть текущие значения измеренных величин и любых других программируемых параметров. Рассмотрим технические характеристики модуля, приведённые в таблице 40.

Таблица 40 – Технические параметры модуля ввода/вывода МВА8

Параметры	Значения
Интерфейс	RS-485
Напряжение питания	От 90 до 246 В переменного тока
Потребляемая мощность	Не более 6 ВА
Количество входов	8
Минимальное время опроса одного входа	0,3 с
Минимальные время опроса восьми входов	2 с
Максимальный ток нагрузки источника питания активных датчиков	180 мА
Входное сопротивление при измерении напряжения	>100 кОм
Входное сопротивление при измерении тока	100 Ом
Скорость передачи данных	2,4; 4,8; 9,6; 14,4; 19,2; 28,8; 38,4; 57,6; 115,2 кбит/с
Максимальная длина линии связи	1200 м
Протоколы передачи данных	Modbus RTU, Modbus ASCII, DCON
Встроенный процессор	Atmega128

Анализ технических характеристик устройства ввода/вывода МС производства Segnetics

Модуль МС – это аппаратный модуль, предназначенный для расширения возможностей ввода-вывода, контроллеров семейства SMH 2G, 2Gi. Модуль не является самостоятельным устройством и должен использоваться только совместно с контроллером. Модуль подключается к контроллеру и используется в FBD-программе как дополнительные цифровые и аналоговые входы/выходы. Внешний вид устройства изображён на рисунке 10.7.

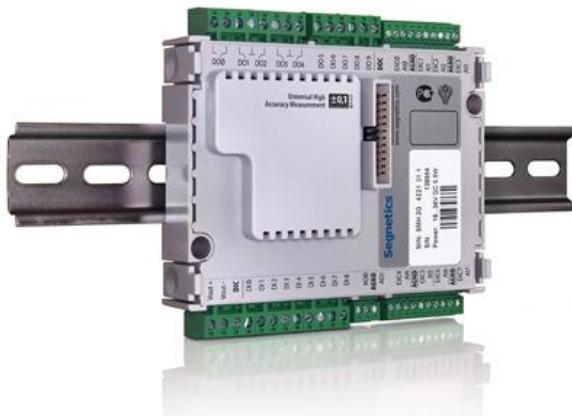


Рисунок 10.7 – Внешний вид модуля ввода/вывода МС производства Segnetics.

Рассмотрим технические характеристики данного устройства в таблице 41.

Таблица 41 – Технические параметры модуля ввода/вывода МС

Параметры	Значения
Интерфейс	RS-485
Напряжение питания	МС не требует подключения отдельного блока питания. Питание модуля обеспечивается контроллером
Потребляемая мощность	4 Вт
Количество цифровых входов	9
Количество цифровых выходов	8
Количество аналоговых выходов	2 или 4
Количество аналоговых входов	8 или 6
Разрядность АЦП	24 бита
Средняя наработка на отказ	50000 ч
Максимальный ток нагрузки источника питания активных датчиков	180 мА
Входное сопротивление при измерении напряжения	>100 кОм

Входное сопротивление при измерении тока	100 Ом
Скорость передачи данных	2,4; 4,8; 9,6; 14,4; 19,2; 28,8; 38,4; 57,6; 115,2 кбит/с
Максимальная длина линии связи	1200 м
Протоколы передачи данных	Modbus RTU, Modbus ASCII, DCON
Встроенный процессор	Atmega128

Устройство МС производства Segnetics имеет ряд ограничений по сравнению с рассмотренными ранее. Оно не может использоваться отдельно и работать как самостоятельное устройство, ему необходим управляющий контроллер. Данный модуль работает исключительно под управлением специализированного программного обеспечения, разработанного производителем и не в полной мере удовлетворяет требованиям технического задания для создания системы сопряжения между исполнительной частью экспериментального стенда и его системой визуализации.

Анализ технических характеристик устройства ввода/вывода Т3102 производства Текон

Модуль Т3102 предназначен для ввода унифицированных аналоговых сигналов тока или напряжения в промышленных условиях в составе системы «ТЕКОНИК», в контролльном и технологическом оборудовании АСУ ТП. Система интеллектуальных модулей «ТЕКОНИК» предназначена для построения распределенных автоматических и автоматизированных систем измерения, контроля, регулирования, диагностики и управления производственными процессами, технологическими линиями и агрегатами. Она легко интегрируется в локальные сети уровней LAN (Ethernet) и Fieldbus (RS 485). Коммуникационный интерфейс состоит из:

- протокол верхнего уровня Т4000 - запрос-ответ в ASCII;
- электрические характеристики - EIA RS 485, экранированная витая пара с волновым сопротивлением 120 Ом;

- скорость передачи - 1,2...115,2 Кбит/с;
- длина линии связи - до 1200 м;
- количество модулей в сети - до 250 модулей ввода-вывода;
- количество модулей в одном сегменте - до 30 модулей ввода-вывода.

Система имеет проектно-компонуемую конфигурацию, то есть процессорный модуль и модули ввода-вывода, которые поставляются в соответствии с заказанной конфигурацией. Пользователь может самостоятельно наращивать или изменять конфигурацию системы. Внешний вид устройства изображён на рисунке 8.



Рисунок 10.8 – Внешний вид модуля ввода/вывода Т3102 производства Текон.

Рассмотрим его технические характеристики, приведённые в таблице 42.

Таблица 42 – Технические параметры модуля ввода/вывода Т3102

Параметры	Значения
Количество каналов	6
Тип гальванической развязки	индивидуальная
Измерительные диапазоны	0...20 мА, 4...20 мА, 0...5 мА, 0...10 В
Входное сопротивление	115 Ом для диапазонов 0...20 мА и 4...20 мА (сопротивление шунта) 402 Ом для диапазона 0...5 мА (сопротивление шунта)

	100 кОм для диапазона 0...10 В
Пределы допускаемой основной приведенной погрешности	± 0,1 %
Время аналого-цифрового преобразования для всех каналов, измерительный интервал	20 мс
Время от начала измерения до получения выходного кода	до 30 мс
Ток потребления модуля при напряжении питания 24 В	не более 100 мА

Рассмотренный модуль Т3102 производства Текон, как его аналог модуль МС производства Segnetics имеет ряд ограничений. Оно не может использоваться отдельно и работать как самостоятельное устройство, ему необходим управляющий контроллер. Данный модуль работает исключительно под управлением специализированного программного обеспечения, разработанного производителем и не в полной мере удовлетворяет требованиям технического задания для создания системы сопряжения между исполнительной частью экспериментального стенда и его системой визуализации.

Анализ технических характеристик устройства ввода/вывода АМ2 производства Siemens

Аналоговые модули расширения имеют интерфейс подключения к внутренней шине и позволяют увеличить количество аналоговых входов и выходов, обслуживаемым одним логическим модулем. Они включают в свой состав:

- Модуль Logo! АМ2 с двумя выходами для измерения унифицированных сигналов напряжения или силы тока;
- Модуль АМ2 RTD с двумя входами для измерения температуры с помощью термометров сопротивления Pt100 и/или Pt1000;
- Модуль Logo! АМ2 AQ с двумя выходами для формирования унифицированных сигналов напряжения или силы тока.

Общее количество аналоговых каналов ввода/вывода на такую систему зависит от типа используемого логического модуля и может достигать 8 аналоговых входов и 2 аналоговых выхода, или 8 аналоговых входов и 8 аналоговых выходов. Внешний вид устройства представлен на рисунке 10.9.



Рисунок 10.9 – Внешний вид модуля ввода/вывода AM2 производства Siemens.

Рассмотрим технические характеристики на модуль AM2 приведённые в таблице 43.

Таблица 43 – Технические параметры модуля ввода/вывода AM2

Параметры	Значения
Напряжение питания	12/24 В
Потребляемый ток	От 15 до 30 мА
Допустимый перерыв в питании	10 мс
Количество входов	8
Гальваническое разделение цепей	Нет
Схемы подключения датчиков	
2-х проводные	Есть

3-х проводные	нет
Входное сопротивление канала	76 кОм при 10 В 250 Ом при 20 мА
Разрешение	10 бит
Интерфейс	RS-485, Ethernet, TCP/IP
Пределы допускаемой основной приведенной погрешности	± 0,1 %
Время цикла аналогового преобразования	50 мс

Интерфейс подключения к внутренней шине аналоговых модулей расширения оснащён устройствами гальванического разделения цепей. Поэтому в линейке расширения могут подключаться с любым напряжением питания и тока.

Для построения системы сопряжения макета роботизированной системы с системой визуализации одним из важных технических требований является время опроса и обработки поступающей информации. Иными словами система сопряжения должна обладать высоким быстродействием. Системы автоматизации и управления, представленные на рынке компаниями Omron, Schneider Electric, Allan Bredley являются специализированными решениями технологических процессов для предприятий различного масштаба и различных отраслей и применительно к нашей задаче не подходят.

В ходе анализа и выбора компонентной базы для системы сопряжения были рассмотрены различные технические решения на базе устройств ввода/вывода с различными параметрами. В нашем случае, для сопряжения системы визуализации на базе УЗИ сканера и исполнительной системы на базе робота-манипулятора, измерительной системы и устройства перемещения игл, необходима система, которая удовлетворяет требованиям технического задания, техническим требованиям к компонентам макета и

экспериментального стенда роботизированной системы. Ключевыми параметрами являются быстродействие системы сопряжения, время от начала измерения до получения выходного кода, время аналого-цифрового преобразования для всех каналов. Из рассмотренных нами устройств ввода/вывода наилучшие показатели приведённых параметров у T3102 производства Текон. Однако, как описывалось выше, данное устройство работает исключительно под управлением специализированного программного обеспечения, разработанного производителем и не в полной мере удовлетворяющего требованиям технического задания для создания системы сопряжения между исполнительной частью экспериментального стенда и его системой визуализации.

Таким образом, для решения задачи сопряжения макета роботизированной системы, измерительной системы и системы визуализации предлагается использовать модуль ввода/вывода AM2 производства Siemens, как устройство в полной мере удовлетворяющее требованиям технического задания и техническим требованиям к компонентам макета и экспериментального стенда.

11 Разработка программных решений для компонентов ПО системы сопряжения

Назначение системы сопряжения состоит в том, чтобы предоставить управляющей программе возможность получать текущие значения параметров управления в режиме, требуемом для обеспечения работы всей системы (в режиме реального времени или по отдельным запросам, в зависимости от типа передаваемых данных), и посылки исполнительному устройству команд на управление с возможностью контроля отработки.

Аппаратно система сопряжения реализована в виде отдельного блока управления. Назначение блока управления заключается в осуществлении сопряжения на аппаратном уровне следующих устройств:

- Робот-манипулятор (РМ)
- Устройство контроля положения иглы (УКПИ)
- Устройство контроля положения устройства перемещения игл (УКП УПИ)
- Датчик усилий УПИ
- Датчик моментов УПИ

Блоком управления интерфейсами системы сопряжения (БУИСС) может являться промышленный логический контроллер, который имеет необходимое количество входов и выходов, а также возможность подключения измерительных устройств с различными интерфейсами (USB 2.0, RS485, RS232, I2C Modbus RTU, TCP/IP, Dcon и др.). Таким образом, блок управления выступает в качестве устройства, предоставляющего единый интерфейс для работы управляющего ПК с перечисленными выше набором управляемых устройств через сеть Ethernet по протоколу TCP/IP. Назначение и аппаратная реализация управляемых устройств приведена ниже.

11.1 Разработка программных решений для робота-манипулятора



Рисунок 11.1 – Робот-манипулятор с блоком управления.

На рисунке 11.1 изображен внешний вид манипулятора с блоком управления. Манипулятор управляется по шести степеням свободы. Устройство подключается в сеть Ethernet и поддерживает протокол Modbus TCP. Для программирования устройства предлагается следующий набор программных средств:

- Уровень графического пользовательского интерфейса
- Уровень интерпретатора URScript.
- С-API уровень.

11.2 Разработка программных решений для устройства контроля положения иглы (УКПИ).

Контроль положения иглы в теле пациента осуществляется по косвенным данным, которые могут быть получены серийно с помощью

выпускаемых устройств ультразвукового сканирования, используемых в медицинской практике. Ввиду дороговизны и закрытости ПО подобных устройств для доработки, контроль положения иглы осуществляется на основе компьютерного анализа изображений, поставляемых данными устройствами. Данное проективное решение принято для достижения максимальной возможной унификации разрабатываемой системы с оборудованием, доступным потребителю. Для обработки изображений снимки в формате JPEG извлекаются из файловой системы УЗИ, включенной в локальную сеть, помостью специальной программной компоненты ПО системы сопряжения. Обработка изображений осуществляется на управляющем компьютере. На верхнем уровне ПО система сопряжения предоставляет метод вывода, позволяющий программе управления получать актуальные на данный момент значения положения иглы. На нижнем уровне обрабатывающей программе, входящей в состав системы сопряжения, предоставляется интерфейс, позволяющий получить актуальное изображение в формате снимка JPEG вместе с данными, характеризующими положение сканера.

11.3 Устройство контроля положения УПИ.

Устройство контроля положения УПИ реализовано на базе оптического датчика. На физическом уровне интерфейсом датчика является RS232, по которому непрерывно передаются координаты УПИ в относительной системе координат устройства. Преобразование последних к единой для всех устройств рабочей системе координат осуществляется системой сопряжения на основании результатов калибровки. Выходными значениями устройства являются три декартовы и три угловые координаты положения УПИ.

11.4 Датчики усилий и моментов УПИ

Аналоговые датчики усилий и моментов измеряют внешние усилия и моменты, приложенные к УПИ. Для преобразования непрерывного сигнала в

цифровой системы сопряжения использует многоканальный АЦП с восьмиразрядной шиной. Значения усилий и моментов измеряются непрерывно. Каждому значению аналоговой переменной в оцифрованном виде соответствует последовательность из двух байтов.

Программное обеспечение (БУИСС) состоит из библиотеки компонентов, реализующей программный интерфейс (API) для управления последней. В соответствии со структурой, назначением и функциональностью аппаратной части, ПО системы сопряжения делится на четыре независимых модуля:

1. ПО управления БУИСС
2. Интерфейс сетевого обмена с РМ
3. Интерфейс сетевого обмена с УКПИ
4. Интерфейс сетевого обмена с УКП УПИ
5. Интерфейс сетевого обмена с датчиком усилий ДУ
6. Интерфейс сетевого обмена с датчиком моментов ДМ

12 Разработка структуры программных компонентов и ПО системы сопряжения

Система сопряжения предназначена для связи отдельных функционально законченных частей с разными интерфейсами и внутренним программным обеспечением. Система состоит из двух частей: программной и аппаратной. Задача аппаратной части состоит в преобразовании протоколов на физических и логических уровнях, чтобы управляющий компьютер обменивался данными с устройствами на одном языке – системе команд. С точки зрения ПО данные устройства, анализ и выбор которых был произведен в разделе 10, представляют собой поток информации, поступающей со всех узлов комплекса.

12.1 Разработка организационной структуры программных компонентов ПО системы сопряжения

Организационная структура с точки зрения аппаратной части по применению модулей ввода/вывода может быть разной. На рисунке 12.1 приведена схема типа «звёздочка». Особенностью применения данной схемы является скорость обработки, приёма и передачи информации в и от управляющего компьютера. Чуть меньшим быстродействием обладает схема, представленная на рисунке 12.2 «дерево», однако удобство использования такой схемы в общейшине, на которой можно расположить устройства нижнего уровня. Оптимальным как точки зрения расположения и разделения системы на уровни является комбинация двух схем.

В таком случае, центральным элементом будет выступать управляющей компьютер, на который стекается информация со всех узлов комплекса через устройства ввода/вывода или маршрутизатор. При этом оптимальным будет использование протоколов TCP/IP и Ethernet, поскольку они во-первых общедоступны, программируемы и имеют высокую скорость передачи данных.

При таком подходе система может масштабироваться по мере её усложнения и наоборот упрощаться. Каждая система (РМ, УПИ, УЗИ, ИС) может быть обеспечена своим модулем ввода/вывода для аккумулирования и передачи информации в центральный маршрутизатор. Принимая во внимание разновидность и количество интерфейсов в системе такой подход представляется целесообразным.

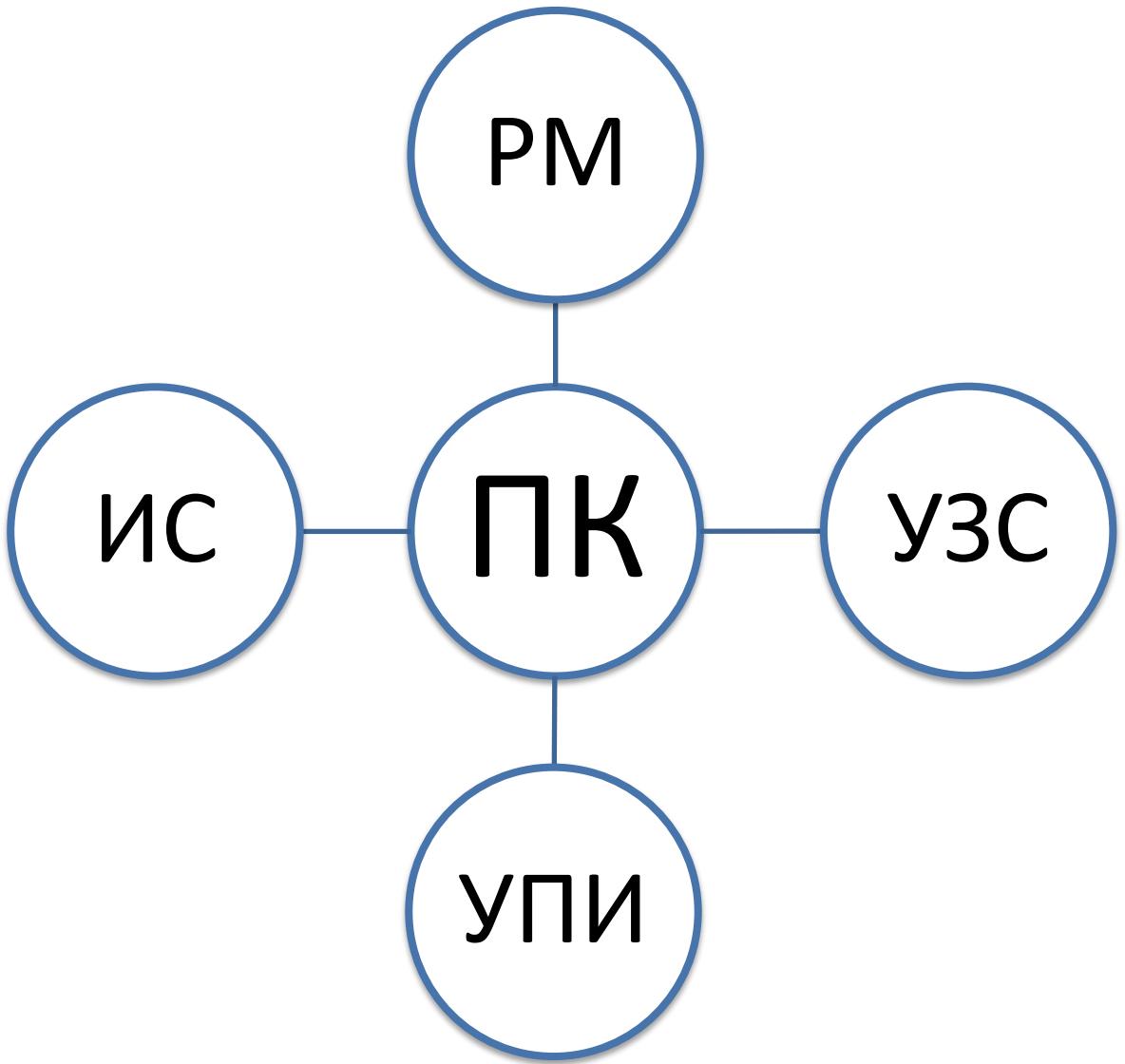


Рисунок 12.1 – Организационная структура системы сопряжения типа «звёздочка», где РМ – робот-манипулятор, ИС – измерительная система, УЗС – ультразвуковой сканер, УПИ – устройство перемещения игл

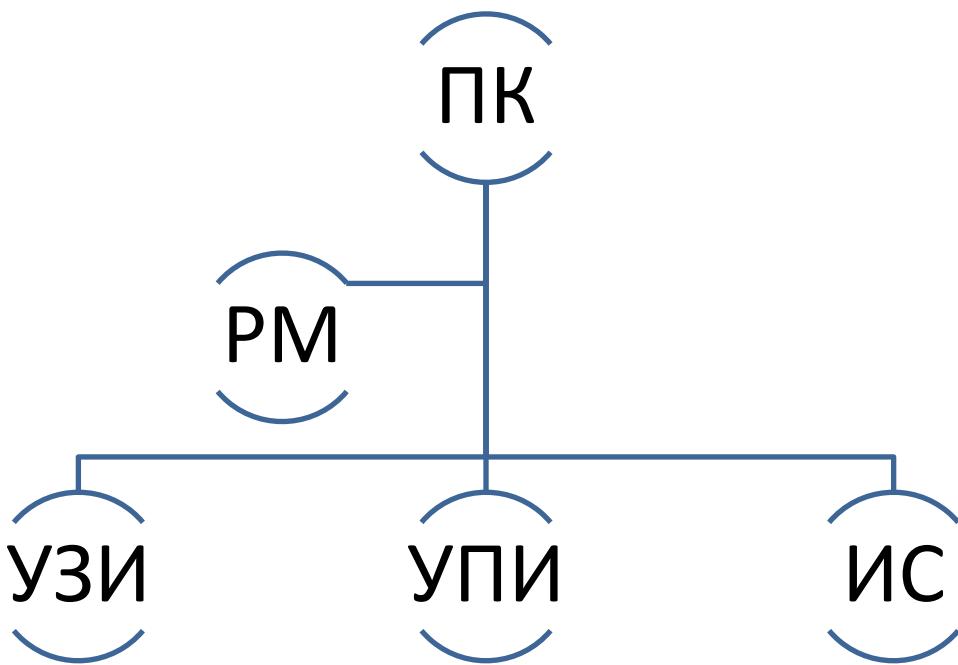


Рисунок 12.2 – Организационная структура системы сопряжения типа «дерево», где РМ – робот-манипулятор, ИС – измерительная система, УЗС – ультразвуковой сканер, УПИ – устройство перемещения игл

Ещё одной альтернативой является схема типа «кольцо» изображённая на рисунке 12.3. Применение данной схемы для решения задачи сопряжения макета роботизированной системы и системы визуализации усложняет и удлиняет процесс обработки, приёмки и передачи информации, что негативно сказывается на быстродействии системы в целом.

Таким образом, рассмотренные варианты организационной структуры аппаратной части системы сопряжения позволяют заключить, что оптимальной для решения поставленных задач выступает комбинация схемы по типу «звёздочка» и схемы по типу «дерево». Один из вариантов структуры системы сопряжения может выглядеть, как показано на рисунке 12.4.

Программное обеспечение для каждого устройства сопряжения будет своё, поскольку оно строго зависит от устройства, с которым сопрягается модуль. То есть на физическом уровне это означает наличие двух микросхем, на логическом, наличие между ними контроллера и ПЛИС.

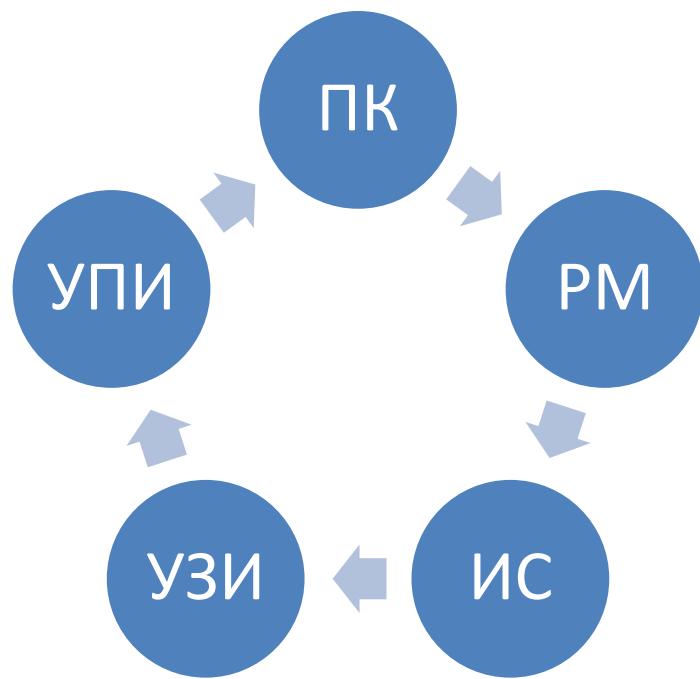


Рисунок 12.3 – Организационная структура системы сопряжения типа «кольцо», где РМ – робот-манипулятор, ИС – измерительная система, УЗС – ультразвуковой сканер, УПИ – устройство перемещения игл

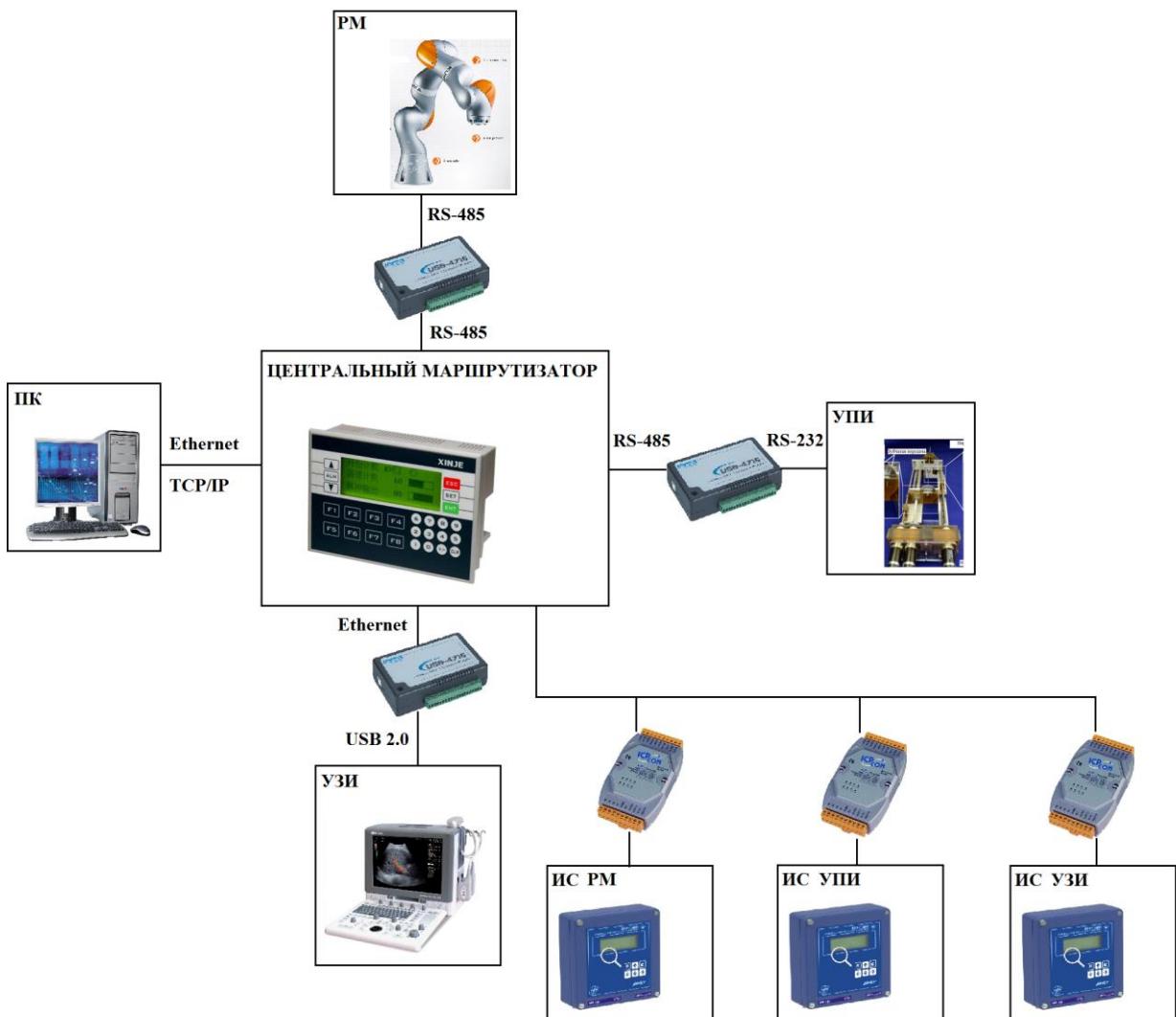


Рисунок 12.4 – Форма организационной структуры системы сопряжения

12.2 Разработка структуры ПО системы сопряжения

Система сопряжения на логическом уровне является промежуточным слоем между управляющей программой (той компонентой ПО, в которой осуществляется выработка управляющего воздействия), и блоком управления БУИСС. Обмен данными между управляющей программой и системой сопряжения осуществляется в виде считывания параметров состояния системы и в виде задания управляющего воздействия. Параметры состояния делятся на две группы: обобщенные координаты и обобщенные усилия датчиков УПИ, а также обобщенные координаты положения острия иглы. Обобщенные координаты УПИ задают положение УПИ в глобальной системе координат устройства, которая определяется пользователем перед

началом эксперимента, после чего происходит калибровка устройства. Иными словами, обобщенные координаты положения УПИ определяют преобразование координат из локальной системы координат УПИ, жестко связанной с последним, в глобальную систему координат устройства. Логически представляются шестикомпонентным вектором.

Обобщенные координаты острия иглы определяются программным обеспечением УКПИ и относятся к глобальной системе координат. Обобщенные усилия представляют собой значения усилий и моментов, и измеряются в локальной системе координат УПИ. Логически также представляются шестикомпонентным вектором.

Управляющее воздействие представляет собой значения приращений глобальных координат УПИ. Контролирование отработки управляющего воздействия реализуется при помощи механизма обратного вызова. Общая структура ПО системы сопряжения приведена на рисунке 12.5

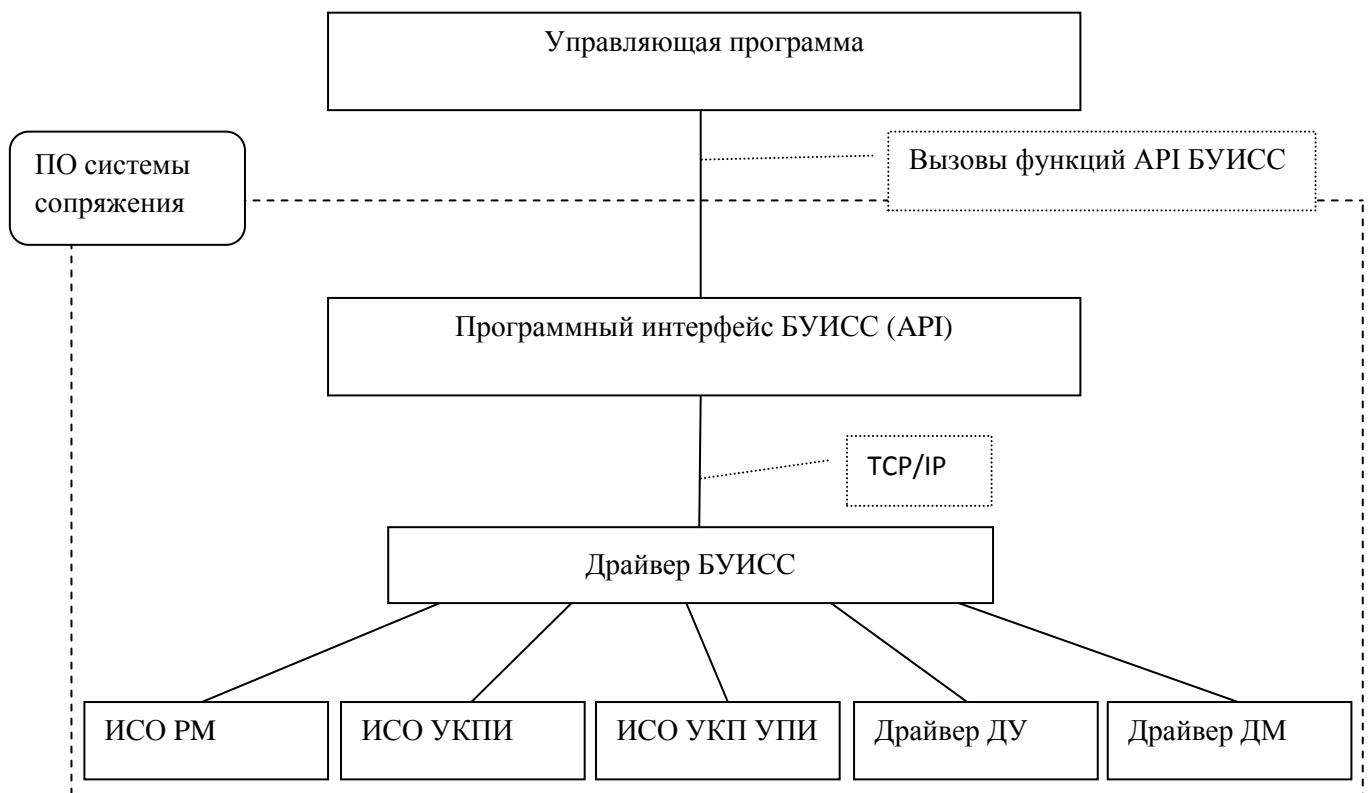


Рисунок 12.5 Структура ПО системы сопряжения

Таким образом, в разделе проведена разработка структура системы сопряжения. Предложена схема взаимодействия между аппаратной частью и программной частью. Определена архитектура построения системы сопряжения. Разработаны структуры программных компонентов и ПО системы сопряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы на отчетном этапе проведен обзор научных и информационных источников по математическому моделированию. Описаны подходы к созданию опытных образцов гибких игл, на основе полученных, из обзора литературы, выводов разработаны структура и параметры математического моделирования с учётом таких важных вопросов как травматичность ткани при перемещении по криволинейным траекториям, вопрос устойчивости, заданной точности позиционирования, численный расчёт при таких перемещениях.

Разработана математическая модель движения кончика иглы по криволинейно траектории. Описаны основные уравнения. Проведена разработка математических моделей для трёх типов игл: прямолинейная, круговая, эллиптическая. В ходе разработки модели решена краевая задача. Получены графические интерпретации при различных параметрах различных типов игл.

На базе полученных математических моделей осуществлён численный расчёт параметров движения иглы для трёх типов игл: прямолинейной, круговой, эллиптической.

Разработаны алгоритмы функционирования макета роботизированной системы по введению радионуклидных микроисточников в тело пациента по линейной и криволинейной траекториям. Разработанные алгоритмы управления макетом роботизированной системы по введению радионуклидных микроисточников в область фантома опухоли охватывают весь спектр рассмотренных при математическом моделировании вопросов.

На базе представленных алгоритмов разработано программное обеспечение управления макетом роботизированной системы. Произведён выбор программной среды, выбор интерфейса математических расчётов, анализ и выбор данных. Приведено полное описание программы.

Разработаны технические требования к компонентам макета роботизированной системы.

Разработаны технические требования к компонентам экспериментального стенда для проведения исследований.

На основе разработанных требований к компонентам макета проведён анализ и выбор компонентной базы.

Разработаны технические требования к системе сопряжения макета роботизированной системы по данным с УЗ и МРТ.

Проведён анализ и выбор компонентной базы системы сопряжения.

Разработаны программные решения для компонентов ПО системы сопряжения.

Разработана структура программных решений компонентов ПО системы сопряжения.

Проведенные на данном этапе НИР работы являются актуальными, обладают научной и технической новизной.

Поставленные задачи на данном этапе работы решены в полном объеме и в соответствии с Техническим заданием и Календарным планом работ. Соответствующие материалы размещены на сайте <http://rtc.ru/about/fcp.shtml>.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Jienan D. et al. Medical needle steering for lung biopsy: experimental results in tissue phantoms using a robotic needle driver // Imaging Science and Information Systems (ISIS), Department of Radiology, Georgetown University Medical Center, USA. Washington, DC. 2008.
2. Kemal F. Advanced Path Planning for a Neurosurgical Flexible Catheter // Delft University of Technology. 2012, 14–18 pp.
3. Abayazid M. et al. Integrating Deflection Models and Image Feedback for Real-Time Flexible Needle Steering // IEEE Transactions on Robotics. – 2013. – Vol. 29. – P. 542– 553.
4. Noah J. Cowan. et al. Robotic needle steering: Design, Modeling, Planning and Image Guidance // Johns Hopkins University, USA, Baltimore. – 2011.
5. Conor J. W., Alexander H. S., Rajiv G. Preliminary Evaluation of Robotic Needle Distal Tip Repositioning // Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology., Cambridge. 2013.
6. Seong Y.K., Luca F., Ferdinando R. Closed-Loop Planar Motion Control of a Steerable Probe with a “Programmable bevel” Inspired by Nature // Department of Mechanical Engineering, Imperial College London., UK. 2010.
7. Phillip J.S., Jessica B., Huter B., Robert J. A Flexure-Based Steerable Needle: High Curvature With Reduced Tissue Damage // Department of Mechanical Engineering, Vanderbilt University., Nashville. 2012.
8. Tarun K.P., Adam P.D., Parsaoran H., Kurosh D., Yan.Y.. A novel curvilinear approach for prostate seed implantation // Medical Physics. 2012. Vol 39, №4. P. 1887-1892.
9. Felix O. Image-Guided Percutaneous Intervention of a Flexible NeedleL Design, Development and Control // A Guide for Healthcare Institutions // Department of Radiation Oncology Robotics and Medical Physics Laboratory University Hospital Case Mefical Center Case Wester Reserve University., Cleveland. 2012.

10. Goksel O., Dehghan E., Salcudean E.S. Modeling and Simulation of Flexible Needles // The Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia., Canada. 2009.
11. Биргера И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Том 1. / Справочник в трёх томах под общей редакцией. – М.: Изд-во Машиностроение. 1988. С. 831.
12. Биргера И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Том 1. / Справочник в трёх томах под общей редакцией. – М.: Изд-во Машиностроение. 1988. С. 567.
13. Nikolai H., Michael B., Jean-Alexandre L., Jocelyne T. A 3D Ultrasound Robotic Prostate Brachytherapy System with Prostate Motion Tracking // Agence Nationale de la Recherche, France. 2012.
14. Bruce R.T., AAPM and GEC_ESTRO guidelines for image-guided robotic brachytherapy: Report of Task Group 192 // Medical Physics. 2014. Vol 41, №10. P. 9-10.
15. Yan Y., Tarun K.P., Zhang Y.D., Ng W.S., Misic V. Robot-Assisted Prostate Brachytherapy // Department of Radiation Oncology, Thomas Jefferson University., Philadelphia. 2007.
16. Venselaar J.L.M., Perez-Calatayud J. A Practical Guide To Quality Control Of Brachytherapy Equipment// European Guidelines For Quality Assurance In RadioTherapy. 2004 Booklet №8.
17. Li-Ming S., Dan S., Thomas W.J., Alexandru P., William W. R., Jeffrey A.C., Sanjay R., Sephen B.S., Louis R.K. O. Robotic Percutaneous Access to the Kidney: Comparisson with Standard Manual Access // Journal of Endourology. 2002. Vol 16, №7. P. 471-475.
18. Vera L. A robotic device for MRI-guided prostate brachytherapy // Radiotherapie van het Universitair Medisch Centrum Utrecht., Nederlands. 2008.
19. Jessica B., Phillip J.S., Ray A.L., Kyle D.W., Robert J.W. Debulking From Within: A Robotic Steerable Cannula for Intracerebral Hemorrhage

Evacuation // Transactions On Biomedical Engeneering. 2013. Vol 60, №9. P. 2567-2575.

20. Hao S., Camilo A., Cole G.A. High-field MRI-compatible needle placement robot for prostate intaerventions // Stud. Health Technol. Inform. – 2011. – Vol. 163. – P. 623–629.
21. Podder T. K. et al. Effects of velocity modulation during surgical needle insertion in Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society // IEEE, New York, NY, 2005. Vol. 6, 5766– 5770 pp.
22. Ivan B., Tarun K. Podder, Yan Y. A Robotic Systems for Radiation Therapy // East Caroline University, USA. 2012.
23. Podder T., Buzurovic, I., Huang, K. et al. MIRAB: an image-guided multichannel robot for prostate brachytherapy // Bodine J. – 2010. – Vol. 3. – P. 39–43.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Описание программы в соответствии с ГОСТ 19.402-78

(Описание программного обеспечения управления макетом

роботизированной системы)

УТВЕРЖДЕНО

МАКЕТ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПО ВВЕДЕНИЮ
РАДИОНУКЛИДНЫХ МИКРОИСТОЧНИКОВ
В ОПУХОЛЕВУЮ ОБЛАСТЬ ПРИ ОПЕРАЦИЯХ БРАХИТЕРАПИИ

Инв. № ПОДЛ.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

Описание программы

Листов 23

2015г.
205

АННОТАЦИЯ

Настоящий документ предназначен для описании архитектуры, организации данных, функций, требований и порядка применения «Программы управления макетом роботизированной системы по внедрению радионуклидных микроисточников» (далее - программа). Макет роботизированной системы (далее - макет) предназначен для отработки перспективных методов введения радионуклидных микроисточников в опухолевую область при операциях брахитерапии.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Описание и терминология предметной области	4
2. Общие сведения о программе	12
3. Функциональное назначение программы	13
4. Состав программы	16
5. Установка и запуск программы	17
6. Взаимодействие с другими программами	18
7. Используемые технические средства	19
8. Данные программы	20

1. ОПИСАНИЕ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Программа должна эксплуатироваться вместе с комплексом технических средств, предназначенных для макетирования роботизированной системы.

Макет обеспечивает отработку новых методик и алгоритмов введения микроисточников, оценку точности позиционирования при их введении, отработку технических средств роботизированного комплекса и устройств их сопряжения, разработку и проверку алгоритмов и программного обеспечения для контроля и управления в процессе операции. Состав макета и взаимодействие его компонентов поясняется на рис.1.1 и рис.1.2.

1.2 Робот-манипулятор (РМ) обеспечивает управляемое пространственное перемещение. На рабочем органе РМ крепится устройство перемещения игл (УПИ) в составе:

- иглы для формирования канала доступа микроисточников; датчика усилий в точке крепления иглы; датчика моментов в точке крепления иглы;
- реперной системы для обеспечения контроля положения УПИ (РС УПИ) .

1.3 Набор фантомов опухоли (ФО), выполненных из сред различной плотности, предназначен для моделирования процесса введения игл по заданным траекториям.

При макетировании на ФО выделяются:

- входная плоскость ФО - граничная плоскость ФО, пересекая которую игла проникает в ФО;
- координаты обнаружения УПИ - координаты УПИ после остановки в ЗКП УПИ (линейные и угловые) ;
- целевая точка ФО - программно заданная точка внутри ФО, в которую при эксперименте должна быть позиционирована игла;

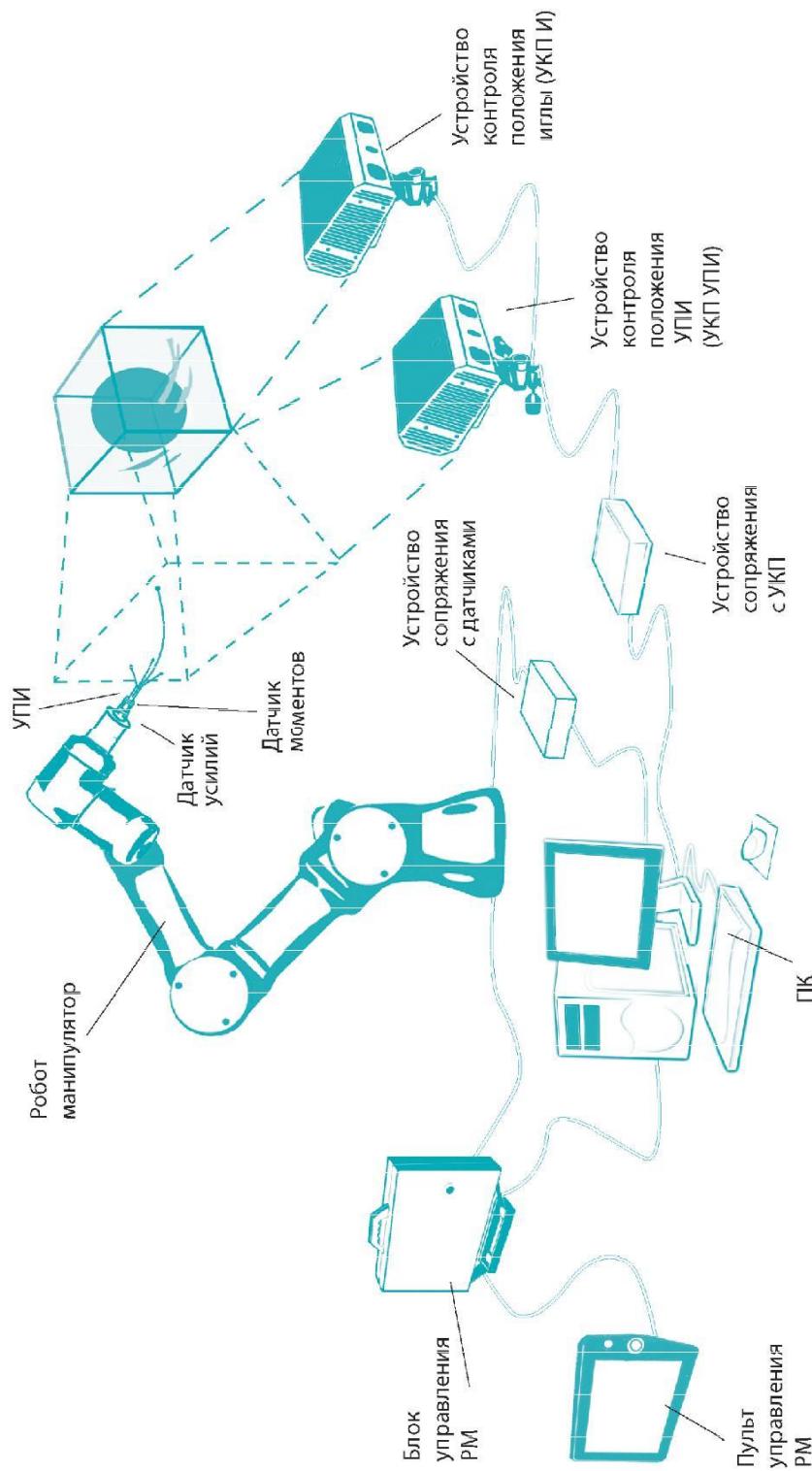


Рисунок 1.1

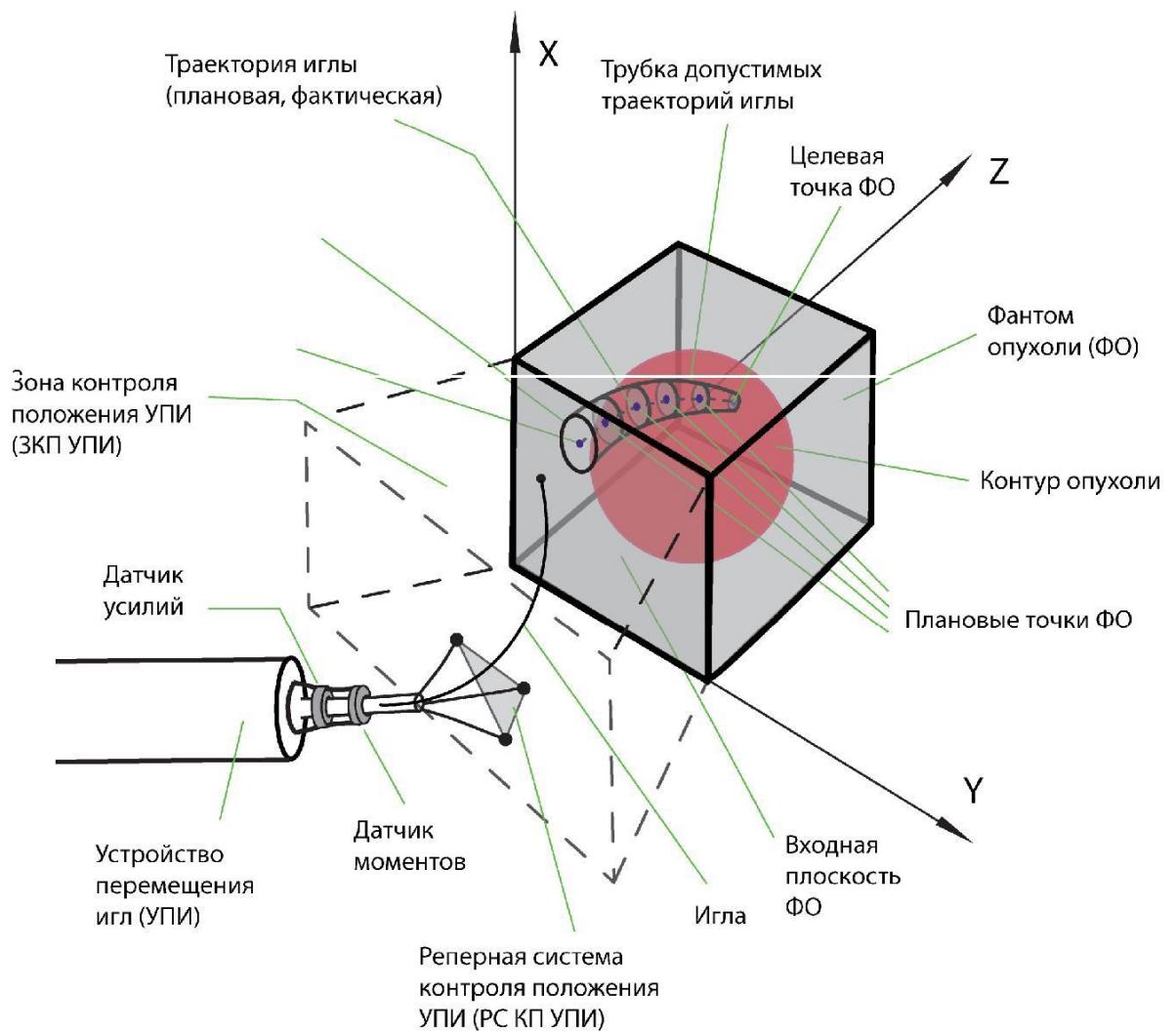


Рисунок 1.2

- плановая точка входа в ФО - априорно заданная или рассчитанная по определенному алгоритму точка на входной плоскости ФО, через которую игла должна проникать в ФО в соответствии с планом эксперимента;
- плановые начальные координаты УПИ - требуемые линейные и угловые координаты УПИ перед проникновением иглы в ФО;
- фактические начальные координаты УПИ - измеренные УКП УПИ линейные и угловые координаты УПИ перед проникновением иглы в ФО;
- фактическая точка входа в ФО - точка на входной плоскости ФО через которую игла проникает в ФО;
- допустимое сечение входа в ФО - область на входной плоскости ФО, включающая плановую точку входа в ФО, внутри которой положение фактической точки входа в ФО считается допустимым в соответствии с планом эксперимента;
- плановая траектория иглы - программно заданная пространственная кривая, по которой игла должна проникать к целевой точке ФО;
- трубка допустимых траекторий иглы - программно заданная поверхность, за границы которой игла не должна проникать в процессе введения в целевую точку ФО;
- плановые точки ФО - точки на плановой траектории иглы, в которых должна находиться игла после очередного шага проникновения в ФО; фактическая траектория иглы - пространственная кривая, по которой игла проникает в ФО к целевой точке;

- контур опухоли - модель границы опухоли, фактически реализованная в ФО с применением анизотропных сред или заданная программно.

1.4 Пространственное положение УПИ перед входной плоскостью ФО (три линейных и три угловых координаты) с заданной точностью определяется оптическим измерительным устройством контроля положения УПИ (УКП УПИ) с использованием РС УПИ. Область чувствительности УКП УПИ образует зону контроля положения УПИ (ЗКП УПИ). УКП УПИ определяет, также, пространственные координаты конца иглы до ее контакта с входной плоскостью ФО.

Пространственное положение конца иглы внутри ФО при движении к целевой точке ФО (три координаты) и фактическую траекторию иглы определяет устройство контроля положения иглы (УКПИ) - оптическое измерительное устройство, в области чувствительности которого находится ФО, выполненный из прозрачного геля.

1.5 Устройство сопряжения с датчиками обеспечивает преобразование данных и интерфейс сетевого обмена программы с датчиками усилий и моментов, размещенных на УПИ. Устройство сопряжения с УКП обеспечивает программное управление УКП УПИ и УКПИ со стороны программы и поступление в программу данных о текущем пространственном положении УКП и конца иглы.

ПК макета с установленной программой обеспечивает управление РМ по протоколу TCP/IP, интерактивное ведение эксперимента с использованием визуального 3D моделирования объектов в ФО и ЗКП УПИ, регистрацию, архивирование и экспорт экспериментальных данных, ретроспективный анализ хода эксперимента.

1.6 Типовая схема проведения эксперимента по макетированию введения игл в операции брахитерапии состоит из следующих шагов:

- сборка УПИ;
- установка ФО;
- монтаж УПИ на рабочем органе РМ;
- калибровка УКП УПИ и УКПИ; -
- запуск программы;
- позиционирование УПИ в ЗКП УПИ (вручную или с использованием пульта управления РМ) ;

- формирование и 3D визуализация исходных данных: координат целевой точки ФО, плановой траектории иглы, трубы допустимых траекторий иглы, плановых точек ФО, плановой точки входа в ФО, плановых начальных координат УПИ;

- выполнение пошаговой интерактивной процедуры перемещения конца иглы к расчетной точке входа в ФО;

каждый шаг включает в себя:

- расчет или ручной ввод новых координат УПИ и конца иглы (прогноза нового положения) ;
- формирование последовательности команд для РМ;
- включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков и УКП УПИ;
- выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;
- автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков и УКП УПИ;
- 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и

иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге;

- оценку точности прогноза положения; после контакта конца иглы и входной плоскости ФО - сравнение координат расчетной и фактической точек входа в ФО, оценка допустимости положения иглы для движения к целевой точке ФО;
- выполнение пошаговой интерактивной процедуры перемещения конца иглы к целевой точке ФО; каждый шаг включает в себя: опрос датчиков усилий и моментов; расчет новых координат УПИ, обеспечивающих перемещение конца иглы к очередной плановой или к целевой точке ФО; формирование последовательности команд для РМ;
- включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;
- выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;
- автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;
- 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге;
- оценку точности прогноза положения, контроль допустимости траектории иглы (невыход фактической траектории иглы из трубы допустимых траекторий);
- при достижении концом иглы целевой точки ФО - оценка точности позиционирования иглы;
- выполнение пошаговой интерактивной процедуры извлечения иглы, каждый шаг включает в себя:
- формирование последовательности команд для РМ в порядке, обратном соответствующему шагу внедрения иглы;

- включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;
- выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;
- автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;
- 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге;
- контроль допустимости траектории иглы из трубы (невыход фактической траектории иглы из трубы допустимых траекторий).
- сохранение данных эксперимента в БД с использованием интерфейсов программы (описания эксперимента, исходные данные, расчетные и фактические траектории движения УПИ и конца иглы, показания датчиков);
- документирование эксперимента, экспорт данных эксперимента с использованием интерфейсов программы;
- ретроспективный анализ хода эксперимента на 3D модели программы.

1.7 Критериями достижения положительного результата при макетировании является достижение для ФО различной плотности:

- максимально возможной точности позиционирования иглы в целевой точке ФО;
- возможности движения игл по криволинейным трубкам допустимых траекторий;
- максимального сужения трубок допустимых траекторий; минимизации количества шагов при движении иглы к расчетной точке входа в ФО и к целевой точке ФО.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ

2.1. Наименование программы – "Программа управления макетом роботизированной системы по внедрению радионуклидных микроисточников". Сокращенное наименование программы "ShmManager".

2.2. Программа эксплуатируется на ПК, входящем в состав макета, на котором должны быть установлены:

операционная система "Windows 7x32 Service Pack 3"; среда выполнения ".NET Framework 4.5";

СУБД Microsoft Jet Database Engine 4.0 или выше; генератор отчетов Fast Report.Net 4.0.

Кроме этого, на ПК макета желательна установка: СУБД MS Access 2010 и среды математических вычислений MATLAB 2015a.

2.3. Программа написана на языках программирования C# (с использованием технологии WPF) и C++. В состав программы входят служебные файлы на языках разметки: XAML, XSD, XML.

2.4 Результаты экспериментальных исследований, полученные с использованием программы сохраняются в БД формата MS Access. С помощью генератора отчетов Fast Report.Net из данных БД экспериментов программой может быть автоматически сгенерирован Журнал испытаний в формате pdf или doc.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ

3.1 Программа предназначена для предоставления пользовательских и программных интерфейсов, обеспечивающих использование макета для проведения экспериментальных научных исследований и разработки технических, алгоритмических и программных решений, направленных на создание прототипа роботизированной системы для проведения операций брахитерапии.

3.2 Программа решает задачи:

- формирования формальных описаний игл и фантомов опухоли (файлов контекста инструментов);
- подготовки исходных данных для экспериментов на макете и планирование эксперимента;
- управления РМ в процессе экспериментов; управления УКП УПИ и получения от него по запросу к
- устройству сопряжения результатов измерения линейных и угловых координат УПИ и линейных координат конца иглы в ЗКП УПИ;
- управления УКПИ и получения от него по запросу к устройству сопряжения результатов измерения линейных координат конца иглы в ФО;
- получения по запросу к устройству сопряжения результатов измерения усилий и моментов в месте крепления иглы от датчиков, установленных на УПИ;
- регистрации всех получаемых программой измерительных данных и управление процессом регистрации;
- создания и визуализации 3D модели ЗКП УПИ для анализа пространственного положения УКП и иглы в ЗКП УПИ в ходе эксперимента или после его завершения;

- создания и визуализации 3D модели ФО для интерактивной подготовки и отображения исходных данных эксперимента, анализа пространственного положения иглы и ее траектории в ходе эксперимента или ретроспективного анализа эксперимента расчета требуемого приращения линейных и угловых координат УПИ для следующего запланированного шага эксперимента при движении иглы в ЗКП УПИ к плановой точке входа в ФО;
- расчета требуемого приращения линейных и угловых координат УПИ для следующего запланированного шага эксперимента при движении иглы в ФО к очередной плановой точке ФО или к целевой точке ФО;
- оценку, отображение на 3D модели, накопление и статистическую обработку погрешностей позиционирования УПИ и конца иглы в ходе эксперимента и по его окончании;
- корректировки, в случае необходимости, плана эксперимента в ходе его проведения, перерасчета после следующего шага в ходе эксперимента количества шагов и координат плановых точек на плановой траектории иглы;
- сохранения результатов эксперимента в БД экспериментов; отбор данных из БД экспериментов;
- визуализация данных из БД экспериментов (текстовая, табличная, графическая);
- экспорт данных из БД экспериментов в общеупотребительные текстовые и графические форматы;
- генерацию файла журнала испытаний в одном из документирующих форматов.

3.3 Для решения указанных задач в программе реализованы пользовательские интерфейсы:

- ввода формальных описаний игл и фантомов опухоли для их сохранения в контекстах инструментов;

- ввода исходных данных, планирования и перепланирования эксперимента;
 - векторной 3D визуализации объектов (вращение, повороты, зум, выделение фрагментов, выделение и скрытие объектов, построение сечений, анимация);
 - подключения, управления, настройки параметров сетевого обмена и контроля состояния технических средств макета – РМ УКП УПИ, УКПИ, датчиков усилия и момента;
 - табличного представления, поиска, сортировки и отбора данных в БД экспериментов;
 - представления данных из БД экспериментов в виде 2D и 3D графиков;
 - генерации отчетов по данным БД экспериментов с предварительным просмотром результата;
- настройки параметров программы. И программные интерфейсы:
- сетевого обмена данными с внешними устройствами: РМ, УКП УПИ, УКПИ, датчиками усилия и момента;
 - преобразования систем координат, пересчета координат объектов к другой системе;
 - геометрического расчета координат после заданных перемещений и оценки взаимного положения совокупности объемных, плоских и точечных объектов в трехмерном пространстве;
 - прогнозного расчета малых и конечных перемещений заделанного тонкого криволинейного упругого стержня частично размещенного в упругой анизотропной среде при малых и конечных линейных и угловых перемещениях заделки.

4. СОСТАВ ПРОГРАММЫ

4.1. Файлы программы "ShmelManager" версии 1.0, предназначеннной для применения в составе макета размещаются в папке "ShmelManager", включающей в себя:

- папку ".\BIN", содержащую исполняемый файл "Shmel_MN.exe" и динамические библиотеки времени выполнения (файлы с расширением "dll");
- папку ".\DEVS", содержащую контексты внешних устройств макета: "RM.xml", "SPDNMD.xml", "SPDN.xml", "SENS.xml" – служебные файлы программы, предназначенные для настройки внешних устройств на применение в составе макета;
- папку ".\TOOLS", в которой размещены контексты инструментов макета: файл NEEDLES.xml, содержащий описания геометрических и механических параметров игл и файл PHANTOMS.xml, содержащий описания геометрических и механических параметров фантомов опухоли;
- папку ".\DB", содержащую файл EXPTemplate.mdb – шаблон БД для накопления данных экспериментов, использующийся при создании новых БД, и файл EXPRReport.frx – шаблон для генерации программой Fast Report.net отчета об эксперименте (журнала испытаний);
- папку ".\SCHEMS", в которой размещены файлы с расширением xsd – спецификации для контекстов устройств и контекстов инструментов макета;
- папку ".\DOC", содержащую электронную версию программной документации в формате pdf.

4.2. Программа "ShmelManager" не использует явным образом реестр WINDOWS.

4.3. Предполагается, что при применении макета в папке DB

программа размещает БД серии экспериментов. Остальные файлы программы остаются без изменений.

5. УСТАНОВКА И ЗАПУСК ПРОГРАММЫ

5.1. Программа устанавливается с помощью исполняемого дистрибутивного файла Shmel_MN_Setup.exe с использованием стандартного установочного диалога Windows.

5.2 Запуск программы из операционной среды Windows осуществляется любым принятым способом: из системного меню, из меню Windows «Пуск/Выполнить...», с использованием ярлыка на рабочем столе, из проводника Windows и пр.

6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ДРУГИМИ ПРОГРАММАМИ

6.1. В процессе рабочего применения программа:

производит обмен данными со встроенным ПО РМ по сетевому протоколу TCP/IP, с ПО устройств сопряжения УКП УПИ, УКПИ, датчиков усилий и моментов используя сетевой интерфейс USB 2.0;

- взаимодействует с системными коммуникационными драйверами; взаимодействует со средой выполнения управляемого кода CLR.NET Framework;
- взаимодействует с операционной средой WINDOWS;
- обменивается данными с СУБД Microsoft Jet Database Engine;
- вызывает генератор отчетов Fast Report.Net 4.0.

6.2. Контексты внешних устройств макета (XML файлы) обеспечивают настройку программных интерфейсов взаимодействия с устройствами без изменения кода исполняемого модуля. Эти файлы могут быть прочитаны и модифицированы любым XML редактором. Назначение настроек приведено в программной документации.

7. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

7.1 Программа может эксплуатироваться на любом ПК, имеющем технические характеристики:

- процессор: Intel Core i3 или более производительный, частота 1.66 ГГц или выше;
- оперативная память: 4 ГБ или более;
- графический контроллер с видеопамятью не менее 256 МБ и поддержкой Open GL;
- LCD дисплей: диагональ 19" или больше;
- жесткий диск ёмкостью не менее 500 ГБ;
- внешние интерфейсы: 5 x USB 2.0, Ethernet 100 Мб/с.

7.2 Сетевой интерфейс с РМ обеспечивается по кабелю Ethernet. Сетевой интерфейс с другими устройствами макета – подключением кабеля USB 2.0 к разъему ПК и соответствующего устройства сопряжения.

8. ДАННЫЕ ПРОГРАММЫ

8.1 Входные данные - данные, использующиеся программой для выполнения своих функций, но созданные вне программы или программой ранее, но при выполнении других функций.

Выходные данные - данные, созданные или модифицированные программой, представляющие собой конечный результат или входные данные для других программ.

Служебные данные - данные постоянного хранения, входящие в состав программы, и предназначенные для ее настройки на применение.

8.2 Применительно к одному эксперименту по проникновению иглы в ФО входными данными программы являются:

- контексты инструментов: файл NEEDLES.xml с формализованными описаниями имеющихся игл и файл PHANTOMS.xml с описаниями свойств фантомов опухоли;
- идентификатор выбранного для эксперимента ФО; координаты обнаружения УПИ; координаты целевой точки ФО;
- координаты реперных точек для расчета плановой траектории иглы в ФО;
- параметры трубки допустимых траекторий иглы (например функция ее диаметра от длины траектории);
- запланированное количество шагов при перемещении иглы к плановой точке входа в ФО;
- запланированное количество шагов при проникновении иглы от плановой точки входа в ФО к целевой точке ФО и их распределение по траектории;
- выходными данными программы являются:

- идентификатор выбранной программой иглы;
- плановая траектория иглы;
- трубка допустимых траекторий иглы;
- координаты плановой точки входа в ФО;
- допустимое сечение входа; координаты промежуточных плановых точек ФО;
- плановые начальные координаты УПИ; плановые значения приращения линейных и угловых координат
- УПИ при движении иглы к плановой точке входа в ФО на каждом шаге;
- фактические значения приращения линейных и угловых координат УПИ при движении иглы к плановой точке входа в ФО на каждом шаге;
- координаты фактической точки входа в ФО, оценка точности позиционирования;
- фактические начальные координаты УПИ, погрешности позиционирования УПИ перед проникновением иглы
- расчетные значения приращения линейных и угловых координат УПИ при движении иглы к промежуточной плановой точке ФО на следующем шаге;
- фактические значения приращения линейных и угловых координат УПИ при движении иглы к промежуточной плановой или к целевой точке ФО на каждом шаге;
- траектория конца иглы в процессе перемещения; фактические значения координат конца иглы после шага,
- оценки погрешности позиционирования иглы относительно промежуточной плановой точки ФО или относительно целевой точки ФО;
- зарегистрированные в процессе движения иглы координаты УПИ и координаты конца игл;

- визуальные представления вышеперечисленных объектов на 3D моделях;
- данные регистрации усилий и моментов; численные представления вышеперечисленных объектов в БД
- сгенерированный отчет об эксперименте и экспортированные из программы файлы.

8.3 Применительно к функции заполнения файлов контекста инструментов - входными данными являются текстовые описания игл и ФО и результаты инструментального измерения их параметров. Выходными данными являются созданные или дополненные контексты инструментов и их визуальные представления в интерфейсе пользователя.

8.4 Применительно к частной задаче оценки точности позиционирования УПИ с помощью РМ в ЗКП УПИ входными данными являются:

- текущие координаты УПИ (линейные и угловые);
- заданные приращения координат УПИ;

выходными данными являются:

- расчетные значения новых координат УПИ; - фактические значения новых координат УПИ;
- рассогласование между расчетными и фактическими значениями, статистические оценки погрешности позиционирования;
- визуальные представления УПИ и траектории его движения на 3D модели.

8.5 Применительно к задаче ретроспективного анализа эксперимента входными данными являются все плановые, расчетные на каждом шаге и фактические значения параметров движения УПИ и иглы. Выходными данными являются представление объектов на 3D модели после каждого шага или в процессе перемещения между шагами

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

БД	база- данных;
ЗКП УПИ	Зона контроля положения УПИ;
ПК	персональный компьютер;
ПО	программное обеспечение;
РМ	Робот-манипулятор;
РС УПИ	Реперная системы для обеспечения контроля положения УПИ;
УКПИ	Устройством контроля положения иглы;
УКП УПИ	Устройством контроля положения УПИ;
УПИ	Устройство перемещения игл;
ФО	Фантом опухоли.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Описание применения в соответствии с ГОСТ 19.502-78;

УТВЕРЖДЕНО

ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ МАКЕТОМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
ПО ВВЕДЕНИЮ РАДИОНУКЛИДНЫХ МИКРОИСТОЧНИКОВ
В ОПУХОЛЕВУЮ ОБЛАСТЬ ПРИ ОПЕРАЦИЯХ БРАХИТЕРАПИИ

Описание применения

Листов 12

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

2015г.

АННОТАЦИЯ

Настоящий документ описывает применение «Программы управления макетом роботизированной системы по внедрению радионуклидных микроисточников в опухолевую область при операциях брахитерапии» версии 1 (далее - программа). Документ предназначен для лиц эксплуатирующих данную программу и содержит общие сведения об условиях ее применения и решаемой задаче.

Для лучшего понимания излагаемого материала рекомендуется предварительное ознакомление с описанием предметной области и ее терминологией, приведенными в документе «Описание программы».

СОДЕРЖАНИЕ

1. Назначение программы	4
2. Условия применения	5
3. Описание задачи	7
4. Входные и выходные данные	10
Перечень сокращений и обозначений	11

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ

1.1 Программа предназначена для:

- организации, планирования, ведения, анализа и протоколирования экспериментов по применению новых технологий введения микроисточников и отработки соответствующих алгоритмов управления;
- макетирования обратной связи для управления РМ с целью повышения точности позиционирования микроисточников.

1.2 Структурное разделение аппаратно независимых функций программы, направленных на обеспечение эксперимента, и интерфейсов сетевого обмена с оборудованием позволяет, при минимальных доработках, использовать программу с техническими средствами различных производителей, тем самым расширяя возможности макетирования.

2. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

2.1 Учитывая, что программа входит в состав макета роботизированного комплекса, условиями ее применения являются обязательное наличие в составе макета следующих технических средств:

- робота манипулятора;
- УПИ с реперной системой;
- экспериментального комплекта игл для введения микроисточников;
- комплекта моделей опухолевой зоны, различной плотности (ФО);
- оптических измерительных устройств, позволяющих с заданной точностью определять пространственное положение УПИ и конца иглы.

Необходимость наличия датчиков усилий и моментов, измеряющих эти величины в основании иглы, должна быть подтверждена в ходе экспериментов.

2.2 Для применения программы необходим ПК с минимальными характеристиками:

- процессор: Intel Core i3 или более производительный, частота 1.66 ГГц или выше;
- оперативная память: 4 ГБ или более;
- графический контроллер с видеопамятью не менее 256 МБ и поддержкой Open GL;
- LCD дисплей: диагональ 19" или больше;
- жесткий диск емкостью не менее 500 ГБ;
- внешние интерфейсы: 5 x USB 2.0, Ethernet 100 Мб/с.

2.3 Для полнофункционального применения программы на ПК должны быть установлены:

- операционная система "Windows 7x32 Service Pack 3";
- среда выполнения ".NET Framework 4.5";

- СУБД Microsoft Jet Database Engine 4.0 или выше;
- генератор отчетов Fast Report.Net 4.0.

Кроме этого, на ПК желательна установка: СУБД MS Access 2010 и среды математических вычислений MATLAB 2015a.

2.4 Разграничение прав доступа в программе отсутствует. Программа эксплуатируется персоналом, имеющим равные права доступа к выполнению всех функций программы и одинаковую квалификацию. Квалификация персонала должна включать:

- понимание целей, задач, методик, ограничений и критериев оценки результата проводимых экспериментов, знакомство с техническими средствами макета;
- практические навыки работы с графическим пользовательским интерфейсом операционной системы Windows;
- практические навыки системного администратора на уровне поддержания работоспособности и профилактики технических и системных программных средств ПК и компьютерной периферии;
- практические навыки использования измерительно-вычислительных комплексов;
- знакомство с документацией программы.

Персонал должен быть аттестован на II квалификационную группу по электробезопасности.

2.5 Климатические условия эксплуатации, при которых обеспечивается возможность выполнения всех функций программы, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к техническим средствам макета.

2.6 Программа по смыслу решаемых задач принципиально не является замкнутым изделием и рассчитана на доработку реализованных в ней алгоритмов автоматизации и методик расчета

КПТВ.06042-01 31

по результатам проводимых при ее использовании экспериментов.

3. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

3.1 Типовая схема проведения эксперимента по макетированию введения игл в операции брахитерапии состоит из следующих шагов:

- сборка УПИ;
- установка ФО;
- монтаж УПИ на рабочем органе РМ;
- калибровка УКП УПИ и УКПИ;
- запуск программы;
- позиционирование УПИ в ЗКП УПИ (вручную или с использованием пульта управления РМ) ;
- формирование и 3D визуализация исходных данных: координат целевой точки ФО, плановой траектории иглы, трубы допустимых траекторий иглы, плановых точек ФО, плановой точки входа в ФО, плановых начальных координат УПИ;
- выполнение пошаговой интерактивной процедуры перемещения конца иглы к расчетной точке входа в ФО; каждый шаг включает в себя:
 - расчет новых координат УПИ и конца иглы (прогноза нового положения) ;
 - формирование последовательности команд для РМ;
 - включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков и УКП УПИ;
 - выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;
 - автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков и УКП УПИ;
 - 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге;
 - оценку точности прогноза положения;
- после контакта конца иглы и входной плоскости ФО - сравнение координат расчетной и фактической точек входа в ФО, оценка

- допустимости положения иглы для движения к целевой точке ФО;

- выполнение пошаговой интерактивной процедуры перемещения конца иглы к целевой точке ФО; каждый шаг включает в себя:
 - опрос датчиков усилий и моментов;
 - расчет новых координат УПИ, обеспечивающих перемещение конца иглы к очередной плановой или к целевой точке ФО;
 - формирование последовательности команд для РМ;
 - включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;
 - выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;
 - автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;
 - 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге;
 - оценку точности прогноза положения, контроль допустимости траектории иглы (невыход фактической траектории иглы из трубы допустимых траекторий);
- при достижении концом иглы целевой точки ФО - оценка точности позиционирования иглы;
- выполнение пошаговой интерактивной процедуры извлечения иглы, каждый шаг включает в себя:
 - формирование последовательности команд для РМ в порядке, обратном соответствующему шагу внедрения иглы;
 - включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;
 - выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;
 - автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;
 - 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге

КПТВ.06042-01 31

- контроль допустимости траектории иглы (невыход фактической траектории иглы из трубы допустимых траекторий) .
- сохранение данных эксперимента в БД с использованием интерфейсов программы (описания эксперимента, исходные данные, расчетные и фактические траектории движения УПИ и конца иглы, показания датчиков) ;
- документирование эксперимента, экспорт данных эксперимента с использованием интерфейсов программы;
- ретроспективный анализ хода эксперимента на 3D модели программы.

3.2 Критериями положительного результата при макетировании является достижение для ФО различной плотности:

- максимально возможной точности позиционирования иглы в целевой точке ФО;
- возможности движения игл по криволинейным трубкам допустимых траекторий;
- максимального сужения трубок допустимых траекторий;
- минимизации количества шагов при движении иглы к расчетной точке входа в ФО и к целевой точке ФО.

4. ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

4.1. Входные и выходные данные программы с точки зрения отдельных сценариев ее применения в ходе макетирования изложены в п.9 «Описания программы».

4.2 С точки зрения конечных целей макетирования входными данными программы являются сочетания ФО различной плотности, игл, различной конфигурации и ограничений на вид траектории.

Выходными данными - экспериментально подтвержденные и оптимизированные по критериям п.3.2 алгоритмы, адаптированные к наибольшему числу сочетаний входных данных.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

БД - база данных;

ЗКП УПИ – зона контроля положения УПИ;

ПК - персональный компьютер;

ПО - программное обеспечение;

РМ - Робот-манипулятор;

РС УПИ - Реперная системы для обеспечения контроля положения УПИ;

УКПИ - Устройство контроля положения иглы;

УКП УПИ - Устройство контроля положения УПИ; УПИ Устройство перемещения игл;

ФО Фантом опухоли.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Руководство системного программиста в соответствии с ГОСТ 19.503-79

УТВЕРЖДЕНО

ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ МАКЕТОМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПО
ВВЕДЕНИЮ РАДИОНУКЛИДНЫХ МИКРОИСТОЧНИКОВ
В ОПУХОЛЕВУЮ ОБЛАСТЬ ПРИ ОПЕРАЦИЯХ БРАХИТЕРАПИИ

Руководство системного программиста

Листов 12

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

2015 г.

АННОТАЦИЯ

Настоящий документ предназначен для системного программиста, осуществляющего установку «Программы управления макетом роботизированной системы по внедрению радионуклидных микроисточников в опухолевую область при операциях брахитерапии» версии 1.0 (далее - программа), настройку операционной среды на работу с программой, удаление программы.

Документ не содержит сведений по установке и настройке ПО технических средств макета, являющегося составной частью этих технических средств. Для установки и настройки этого ПО следует обратиться к программной документации, поставляемой в составе этих технических средств.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие сведения о программе	4
2. Структура программы	6
3. Установка и удаление программы	7
4. Проверка программы	9
5. Сообщения программы	10
Перечень сокращений и обозначений	11

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ

1.1. Наименование программы - "Программа управления макетом роботизированной системы по внедрению радионуклидных микроисточников". Сокращенное наименование программы "ShmManager".

1.2 Условиями применения программы являются обязательное наличие в составе макета следующих технических средств:

- робота манипулятора; УПИ с реперной системой;
- комплекта игл для введения микроисточников; комплекта моделей опухолевой зоны (ФО);
- оптических измерительных устройств УКП УПИ и УКПИ, позволяющих с заданной точностью определять пространственное положение УПИ и конца иглы.

1.3. Программа эксплуатируется на управляющем ПК макета, любом ПК, имеющем технические характеристики:

- процессор: Intel Core i3 или более производительный, частота 1.66 ГГц или выше;
- оперативная память: 4 ГБ или более;
- графический контроллер с видеопамятью не менее 256 МБ и поддержкой Open GL;
- LCD дисплей: диагональ 19" или больше; жесткий диск емкостью не менее 500 ГБ;
- внешние интерфейсы: 5 x USB 2.0, Ethernet 100 Мб/с.

1.4 На управляющем ПК перед применением программы должны быть установлены:

- операционная система "Windows 7x32 Service Pack 3";
- среда выполнения ".NET Framework 4.5";

- СУБД Microsoft Jet Database Engine 4.0 или выше;
генератор отчетов Fast Report.Net 4.0.

При отсутствии на управляющем ПК, среда выполнения ".NET Framework 4.5" и генератор отчетов "Fast Report.Net 4.0", в части необходимой для применения программы, устанавливаются с дистрибутивного комплекта программы, перед установкой самой программы.

1.5. Программа написана на языках программирования C# (с использованием технологии WPF) и C++ и предназначена для:

- организации, планирования, ведения, анализа и протоколирования экспериментов по применению новых технологий введения микроисточников и отработки соответствующих алгоритмов управления;
- макетирования обратной связи для управления РМ с целью повышения точности позиционирования микроисточников.

2. СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ

2.1 Программа поставляется как набор папок, корневой из которых является "ShmelManager". Папка "ShmelManager" включает в себя:

- папку ".\BIN", содержащую исполняемый файл "Shmel_MN.exe" и динамические библиотеки времени выполнения (файлы с расширением "dll");
- папку ".\DEVS", содержащую контексты внешних устройств макета: "RM.xml", "SPDNMD.xml", "SPDN.xml", "SENS.xml" - служебные файлы программы, предназначенные для настройки внешних устройств на применение в составе макета;
- папку ".\TOOLS", в которой размещены контексты инструментов макета: файл NEEDLES.xml, содержащий описания геометрических и механических параметров игл и файл PHAN-TOMS.xml, содержащий описания геометрических и механических параметров фантомов опухоли;
- папку ".\DB", содержащую файл EXPTemplate.mdb - шаблон БД для накопления данных экспериментов, использующийся при создании новых БД, и файл EXPReport.frx - шаблон для генерации программой Fast Report.net отчета об эксперименте (журнала испытаний);
- папку ".\SCHEMS", в которой размещены файлы с расширением xsd - спецификации для контекстов устройств и контекстов инструментов макета;
- папку ".\DOC", содержащую электронную версию программной документации в формате pdf.

2.2 Программа в ходе работы взаимодействует с коммуникационными драйверами технических устройств макета: РМ, УКП УПИ, УКПИ, устройства сопряжения с датчиками. Коммуникационные драйверы этих устройств не являются частью программы.

3. УСТАНОВКА И УДАЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ

3.1. Перед установкой программы необходимо в соответствии с технической и программной документацией технических средств макета произвести:

- подключение блока управления РМ, УКП УПИ, УКПИ и устройство сопряжения с датчиками к управляющему ПК макета с использованием интерфейсов Ethernet и USB;
- установку на управляющем ПК коммуникационных драйверов, поставляемых в комплекте технических средств.

3.2 Программа устанавливается с помощью установочного комплекта (дистрибутива). В состав дистрибутива входит файловый архив и исполняемый файл Shmel_MN_Setup.exe.

Установочный комплект может быть скопирован на любой носитель (оптический диск, жесткий диск, Flash накопитель) и использован для установки программы с этого носителя.

3.3 Для установки программы необходимо доступным способом запустить на выполнение исполняемый файл Shmel_MN_Setup.exe. Попытка повторной установки автоматически блокируется.

Программа установки проверяет наличие на ПК установленной программной среды Framework 4.5. При ее отсутствии установка производится из дистрибутива программы.

Вместе с программой устанавливаются, также, компоненты генератора отчетов Fast Report.Net 4.0, необходимые для применения программы.

3.4 В ходе установки системному программисту предлагается только выбрать папку на жестком диске ПК, в которую будет размещена программа. Рекомендуется использовать папку,

предлагаемую по умолчанию. Программа не поддерживает систему контроля версий, не проверяет подлинность, не запрашивает серийный номер, не производит каких либо сетевых соединений с удаленными компьютерами

4. ПРОВЕРКА ПРОГРАММЫ

4.1 Проверка программы на работоспособность производится автоматически в режиме самодиагностики непосредственно после загрузки программы. Программа проверяет:

- наличие сетевых соединений с техническими средствами макета;
- наличие файлов контекста внешних устройств макета: "RM.xml", "SPDNMD.xml", "SPDN.xml", "SENS.xml";
- наличие файлов контекста инструментов макета NEEDLES.xml и PHANTOMS.xml;
- наличие и контрольные суммы служебных файлов, необходимых для выполнения программы;
- наличие необходимого свободного места на жестком диске для создания временных файлов программы в процессе ее применения.

5. СООБЩЕНИЯ ПРОГРАММЫ

5.1 Сообщения программы идентифицируются именем модуля и номером сообщения в модуле. Сообщения программы их описания и действия, которые необходимо предпринять по этим сообщениям приведены в отдельном документе.

4.2 Программа в процессе своей работы в фоновом режиме ведет протокол обмена с внешними устройствами макета (текстовый файл `ShmelManager_Dev.log`), в котором автоматически фиксируются переданные устройствам команды и отклики на них, поступающие от драйверов, в том числе - сообщения об ошибках устройств.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

БД	база- данных;
ЗКП УПИ	Зона контроля положения УПИ;
ОС	операционная система;
ПК	персональный компьютер;
ПО	программное обеспечение;
РМ	Робот-манипулятор;
РС УПИ	Реперная системы для обеспечения контроля положения УПИ;
УКПИ	Устройство контроля положения иглы;
УКП УПИ	Устройство контроля положения УПИ;
УПИ	Устройство перемещения игл;
ФО	Фантом опухоли.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Руководство оператора в соответствии с ГОСТ 19.505-79

УТВЕРЖДЕНО

МАКЕТ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПО ВВЕДЕНИЮ
РАДИОНУКЛИДНЫХ МИКРОИСТОЧНИКОВ
В ОПУХОЛЕВУЮ ОБЛАСТЬ ПРИ ОПЕРАЦИЯХ БРАХИТЕРАПИИ

Инв. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

Руководство оператора

Листов 23

2015г.

АННОТАЦИЯ

Настоящий документ предназначен для оператора, осуществляющего управление макетом роботизированной системы по внедрению радионуклидных микроисточников в опухолевую область при операциях брахитерапии, настройку операционной среды на работу с макетом.

Для лучшего понимания излагаемого материала рекомендуется предварительное ознакомление с описанием предметной области и ее терминологией, приведенными в документе «Описание программы».

СОДЕРЖАНИЕ

1. Описание и терминология предметной области	4
2. Назначение программы	12
3. Условия выполнения программы	13
4. Выполнение программы	16
5. Сообщения оператору	17
6. Перечень сокращений и обозначений	18

1. ОПИСАНИЕ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Программа должна эксплуатироваться вместе с комплексом технических средств, предназначенных для макетирования роботизированной системы.

Макет обеспечивает отработку новых методик и алгоритмов введения микроисточников, оценку точности позиционирования при их введении, отработку технических средств роботизированного комплекса и устройств их сопряжения, разработку и проверку алгоритмов и программного обеспечения для контроля и управления в процессе операции. Состав макета и взаимодействие его компонентов поясняется на рис.1.1 и рис.1.2.

1.2 Робот-манипулятор (РМ) обеспечивает управляемое пространственное перемещение. На рабочем органе РМ крепится устройство перемещения игл (УПИ) в составе:

иглы для формирования канала доступа микроисточников; датчика усилий в точке крепления иглы; датчика моментов в точке крепления иглы;

реперной системы для обеспечения контроля положения УПИ (РС УПИ).

1.3 Набор фантомов опухоли (ФО), выполненных из сред различной плотности, предназначен для моделирования процесса введения игл по заданным траекториям.

При макетировании на ФО выделяются:

- входная плоскость ФО - граничная плоскость ФО, пересекая которую игла проникает в ФО;

- координаты обнаружения УПИ - координаты УПИ после остановки в ЗКП УПИ (линейные и угловые);
- целевая точка ФО - программно заданная точка внутри ФО, в которую при эксперименте должна быть позиционирована игла;

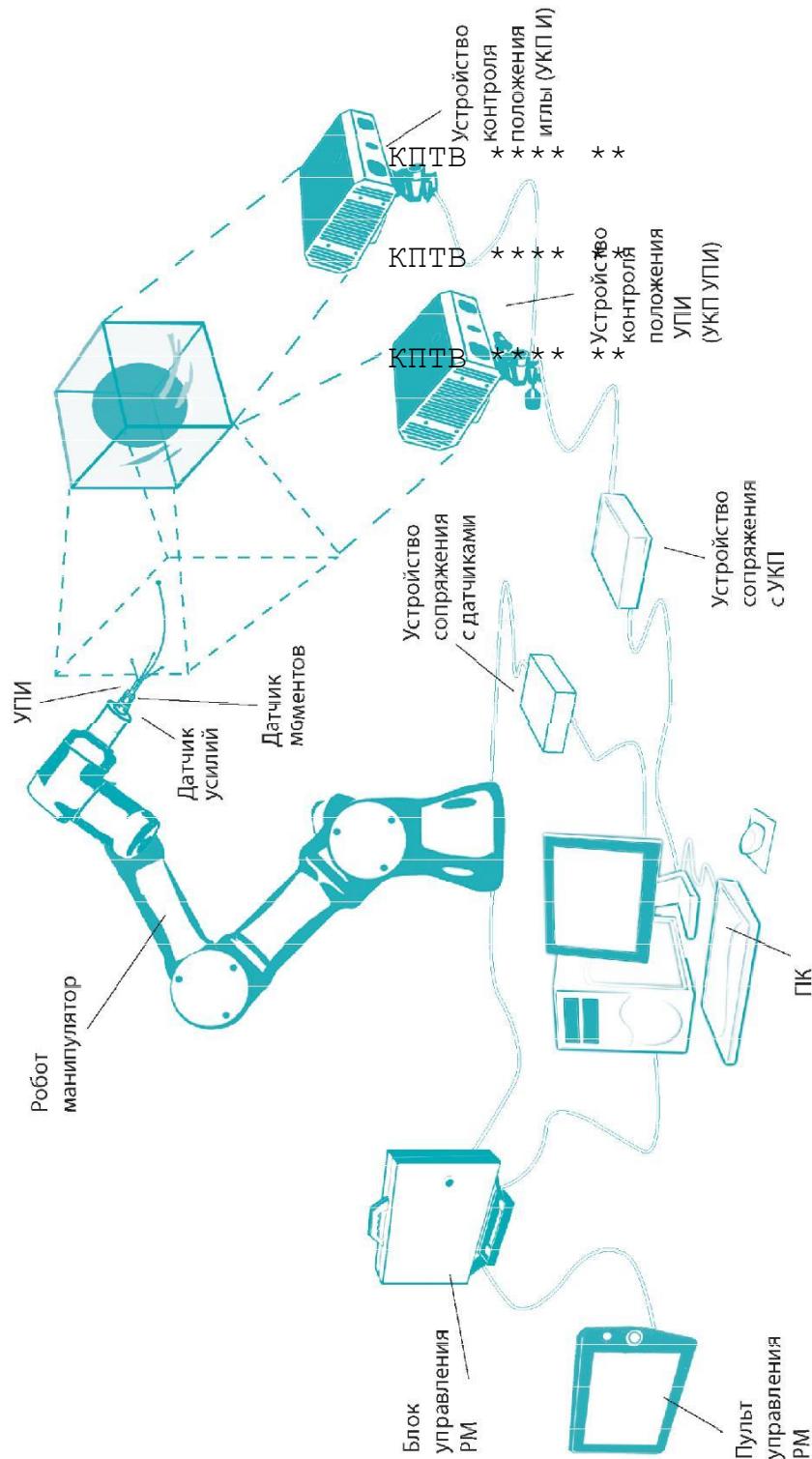


Рисунок 1.1

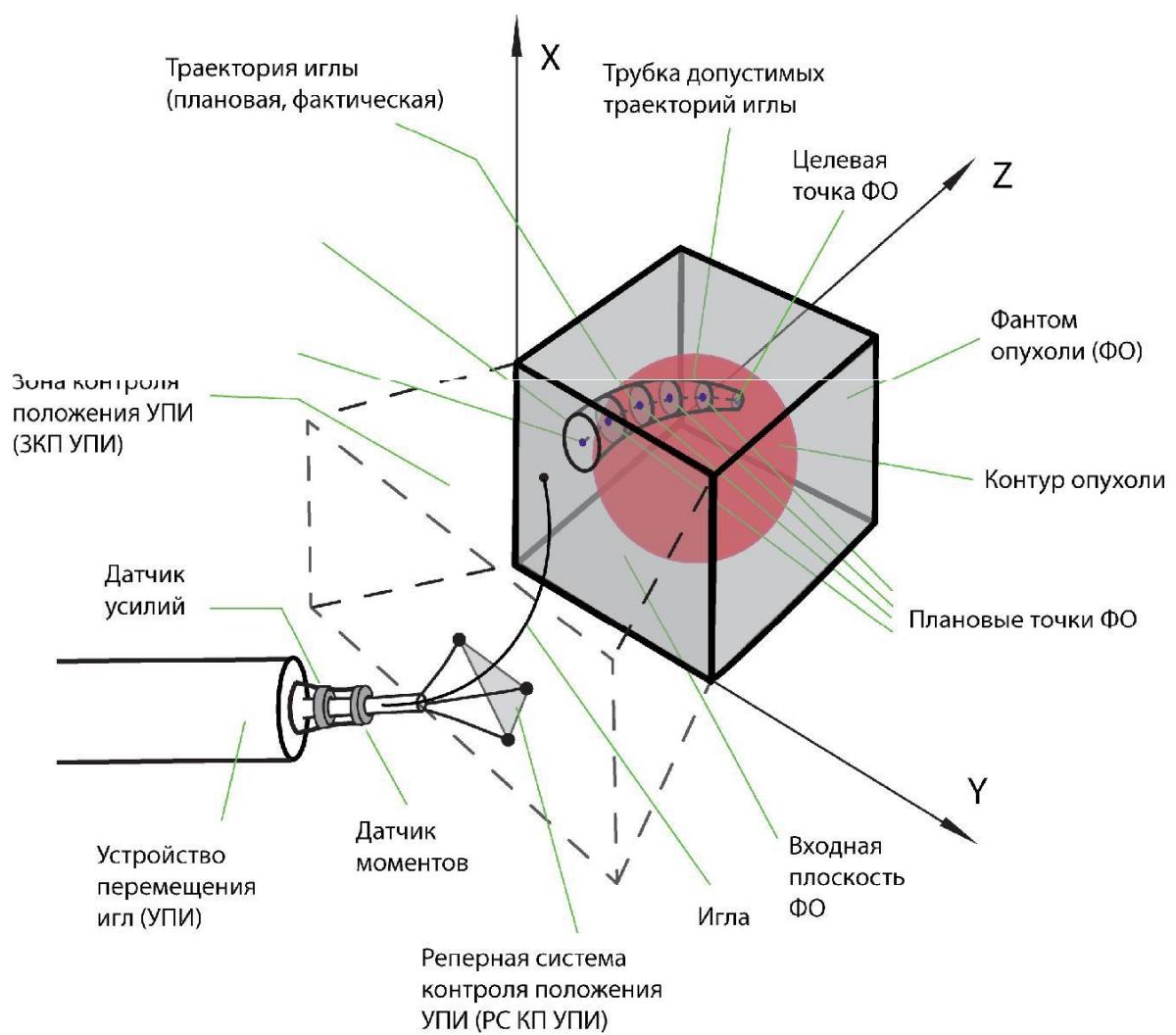


Рисунок 1.2

- плановая точка входа в ФО - априорно заданная или рассчитанная по определенному алгоритму точка на входной плоскости ФО, через которую игла должна проникать в ФО в соответствии с планом эксперимента;
- плановые начальные координаты УПИ - требуемые линейные и угловые координаты УПИ перед проникновением иглы в ФО;
- фактические начальные координаты УПИ - измеренные УКП УПИ линейные и угловые координаты УПИ перед проникновением иглы в ФО;
- фактическая точка входа в ФО - точка на входной плоскости ФО через которую игла проникает в ФО;
- допустимое сечение входа в ФО - область на входной плоскости ФО, включающая плановую точку входа в ФО, внутри которой положение фактической точки входа в ФО считается допустимым в соответствии с планом эксперимента;
- плановая траектория иглы - программно заданная пространственная кривая, по которой игла должна проникать к целевой точке ФО;
- трубка допустимых траекторий иглы - программно заданная поверхность, за границы которой игла не должна проникать в процессе введения в целевую точку ФО;
- плановые точки ФО - точки на плановой траектории иглы, в которых должна находиться игла после очередного шага проникновения в ФО; фактическая траектория иглы - пространственная кривая, по которой игла проникает в ФО к целевой точке;
- контур опухоли - модель границы опухоли,

фактически реализованная в ФО с применением анизотропных сред или заданная программно.

1.4 Пространственное положение УПИ перед входной плоскостью ФО (три линейных и три угловых координаты) с заданной точностью определяется оптическим измерительным устройством контроля положения УПИ (УКП УПИ) с использованием РС УПИ. Область чувствительности УКП УПИ образует зону контроля положения УПИ (ЗКП УПИ). УКП УПИ определяет, также, пространственные координаты конца иглы до ее контакта с входной плоскостью ФО.

Пространственное положение конца иглы внутри ФО при движении к целевой точке ФО (три координаты) и фактическую траекторию иглы определяет устройство контроля положения иглы (УКПИ) – оптическое измерительное устройство, в области чувствительности которого находится ФО, выполненный из прозрачного геля.

1.5 Устройство сопряжения с датчиками обеспечивает преобразование данных и интерфейс сетевого обмена программы с датчиками усилий и моментов, размещенных на УПИ. Устройство сопряжения с УКП обеспечивает программное управление УКП УПИ и УКПИ со стороны программы и поступление в программу данных о текущем пространственном положении УКП и конца иглы.

ПК макета с установленной программой обеспечивает управление РМ по протоколу TCP/IP, интерактивное ведение эксперимента с использованием визуального 3D моделирования объектов в ФО и ЗКП УПИ, регистрацию, архивирование и

экспорт экспериментальных данных, ретроспективный анализ хода эксперимента.

1.6 Типовая схема проведения эксперимента по макетированию введения игл в операции брахитерапии состоит из следующих шагов:

- сборка УПИ;
- установка ФО;
- монтаж УПИ на рабочем органе РМ;
- калибровка УКП УПИ и УКПИ;
- запуск программы;
- позиционирование УПИ в ЗКП УПИ (вручную или с использованием пульта управления РМ);
- формирование и 3D визуализация исходных данных: координат целевой точки ФО, плановой траектории иглы, трубы допустимых траекторий иглы, плановых точек ФО, плановой точки входа в ФО, плановых начальных координат УПИ;
- выполнение пошаговой интерактивной процедуры перемещения конца иглы к расчетной точке входа в ФО;

каждый шаг включает в себя:

- расчет или ручной ввод новых координат УПИ и конца иглы (прогноза нового положения);
- формирование последовательности команд для РМ;
- включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков и УКП УПИ;
- выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;
- автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков и УКП УПИ;
- 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге;
- оценку точности прогноза положения; после контакта конца иглы и

входной плоскости ФО – сравнение координат расчетной и фактической точек входа в ФО, оценка допустимости положения иглы для движения к целевой точке ФО;

– выполнение пошаговой интерактивной процедуры перемещения конца иглы к целевой точке ФО; каждый шаг включает в себя:

опрос датчиков усилий и моментов; расчет новых координат УПИ, обеспечивающих перемещение конца иглы к очередной плановой или к целевой точке ФО; формирование последовательности команд для РМ;

– включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;

– выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;

– автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;

– 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге;

– оценку точности прогноза положения, контроль допустимости траектории иглы (невыход фактической траектории иглы из трубы допустимых траекторий);

– при достижении концом иглы целевой точки ФО – оценка точности позиционирования иглы;

– выполнение пошаговой интерактивной процедуры извлечения иглы, каждый шаг включает в себя:

– формирование последовательности команд для РМ в порядке, обратном соответствующему шагу внедрения иглы;

– включение автоматической регистрации данных, поступающих от датчиков, УКП УПИ и УКПИ;

– выдачу последовательности команд для РМ, автоматическое перемещение УПИ;

– автоматическое выключение регистрации данных, поступающих от

датчиков, УКП УПИ и УКПИ;

- 3D визуализацию нового пространственного положения УПИ и иглы, просмотр траектории движения иглы на выполненном шаге;
- контроль допустимости траектории иглы (невыход фактической траектории иглы из трубки допустимых траекторий) .
- сохранение данных эксперимента в БД с использованием интерфейсов программы (описания эксперимента, исходные данные, расчетные и фактические траектории движения УПИ и конца иглы, показания датчиков) ;
- документирование эксперимента, экспорт данных эксперимента с использованием интерфейсов программы;
- ретроспективный анализ хода эксперимента на 3D модели программы.

1.7 Критериями достижения положительного результата при макетировании является достижение для ФО различной плотности:

- максимально возможной точности позиционирования иглы в КПТВ **** ** целевой точке ФО;
- возможности движения игл по криволинейным трубкам допустимых траекторий;
- максимального сужения трубок допустимых траекторий; минимизации количества шагов при движении иглы к расчетной точке входа в ФО и к целевой точке ФО.

2. НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ

2.1 Программа предназначена для:

- Организации, планирования, ведения, анализа и протоколирования экспериментов по применению новых технологий введения микроисточников и отработки соответствующих алгоритмов управления;
- макетирования обратной связи для управления РМ с целью повышения точности позиционирования микроисточников.

2.2 Структурное разделение аппаратно независимых функций программы, направленных на обеспечение эксперимента, и интерфейсов сетевого обмена с оборудованием позволяет, при минимальных доработках, использовать программу с техническими средствами различных производителей, тем самым расширяя возможности макетирования.

3. УСЛОВИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ

3.1 Учитывая, что программа входит в состав макета роботизированного комплекса, условиями ее выполнения являются обязательное наличие в составе макета следующих технических средств:

- робота манипулятора;
- УПИ с реперной системой;
- экспериментального комплекта игл для введения микроисточников;
- комплекта моделей опухолевой зоны, различной плотности (ФО);
- оптических измерительных устройств, позволяющих с заданной точностью определять пространственное положение УПИ и кон- ца иглы.

Необходимость наличия датчиков усилий и моментов, измеряющих эти величины в основании иглы, должна быть подтверждена в ходе экспериментов.

3.2 Для применения программы необходим ПК с минимальными характеристиками:

- процессор: Intel Core i3 или более производительный, частота 1.66 ГГц или выше;
- оперативная память: 4 ГБ или более;
- графический контроллер с видеопамятью не менее 256 МБ и поддержкой Open GL;
- LCD дисплей: диагональ 19" или больше;
- жесткий диск емкостью не менее 500 ГБ;
- внешние интерфейсы: 5 x USB 2.0, Ethernet 100 Мб/с.

3.3 Для полнофункционального применения программы на ПК должны быть установлены:

- операционная система "Windows 7x32 Service Pack 3";
- среда выполнения ".NET Framework 4.5";
- СУБД Microsoft Jet Database Engine 4.0 или выше;

- генератор отчетов *Fast Report.Net 4.0*.
- Кроме этого, на ПК желательна установка: СУБД *MS Access 2010* и среды математических вычислений *MATLAB 2015a*.

3.4 Разграничение прав доступа в программе отсутствует. Программа эксплуатируется персоналом, имеющим равные права доступа к выполнению всех функций программы и одинаковую квалификацию. Квалификация персонала должна включать:

- понимание целей, задач, методик, ограничений и критериев оценки результата проводимых экспериментов, знакомство с техническими средствами макета;
- практические навыки работы с графическим пользовательским интерфейсом операционной системы *Windows*;
- практические навыки системного администратора на уровне поддержания работоспособности и профилактики технических и системных программных средств ПК и компьютерной периферии;
- практические навыки использования измерительно-вычислительных комплексов;
- знакомство с документацией программы.

Персонал должен быть аттестован на II квалификационную группу по электробезопасности.

3.5 Климатические условия эксплуатации, при которых обеспечивается возможность выполнения всех функций программы, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к техническим средствам макета.

3.6 Программа по смыслу решаемых задач принципиально не является замкнутым изделием и рассчитана на доработку реализованных в ней алгоритмов автоматизации и методик расчета по результатам проводимых при ее использовании экспериментов.

4. Выполнение программы

4.1 Запуск и завершение программы.

Перед запуском программы необходимо в соответствии с технической и программной документацией технических средств макета произвести:

- подключение блока управления РМ, УКП УПИ, УКПИ и устройство сопряжения с датчиками к управляющему ПК макета с использованием интерфейсов Ethernet и USB;
- установку на управляющем ПК коммуникационных драйверов, поставляемых в комплекте технических средств;
- установку программы на управляющий ПК.

4.2 Программа запускается посредством двойного нажатия левой кнопки мыши на иконке *Shmel_MN* или однократным нажатием кнопки мыши и однократным нажатием кнопки *enter* на клавиатуре управляющего ПК.

4.3 После запуска программы открывается окно с кнопками меню для начала работы как показано на рисунке 4.1



Рисунок 4.1 Меню программы управления макетом роботизированной системы

Меню программы состоит из 4 кнопок:

- Запустить программу;
- Запрограммировать макет;
- настройка макета;
- выключение макета;

4.4 Первый запуск программы нажатием кнопки «Запустить программу» осуществляется только после того как, такая программа была создана и записана в предыдущем сеансе.

4.5 Нажатием кнопки «Запрограммировать макет» запускается окно инициализации робота, как на рисунке 4.2

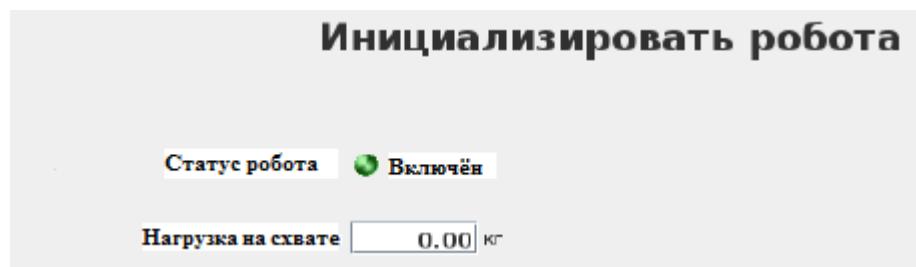


Рисунок 4.2 – Окно инициализации робота

4.6 При инициализации робота при выборе окошка для ввода нагрузки на схвате появляется окно ввода числовых данных в виде калькулятора, как показано на рисунке 4.3

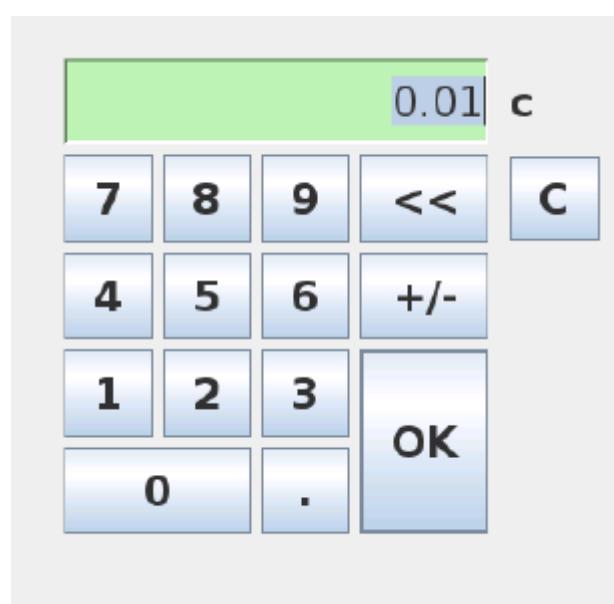


Рисунок 4.4 – Окно ввода числовых данных

4.7 После инициализации робота, появляется окно с вкладками изображённое на рисунке 4.5

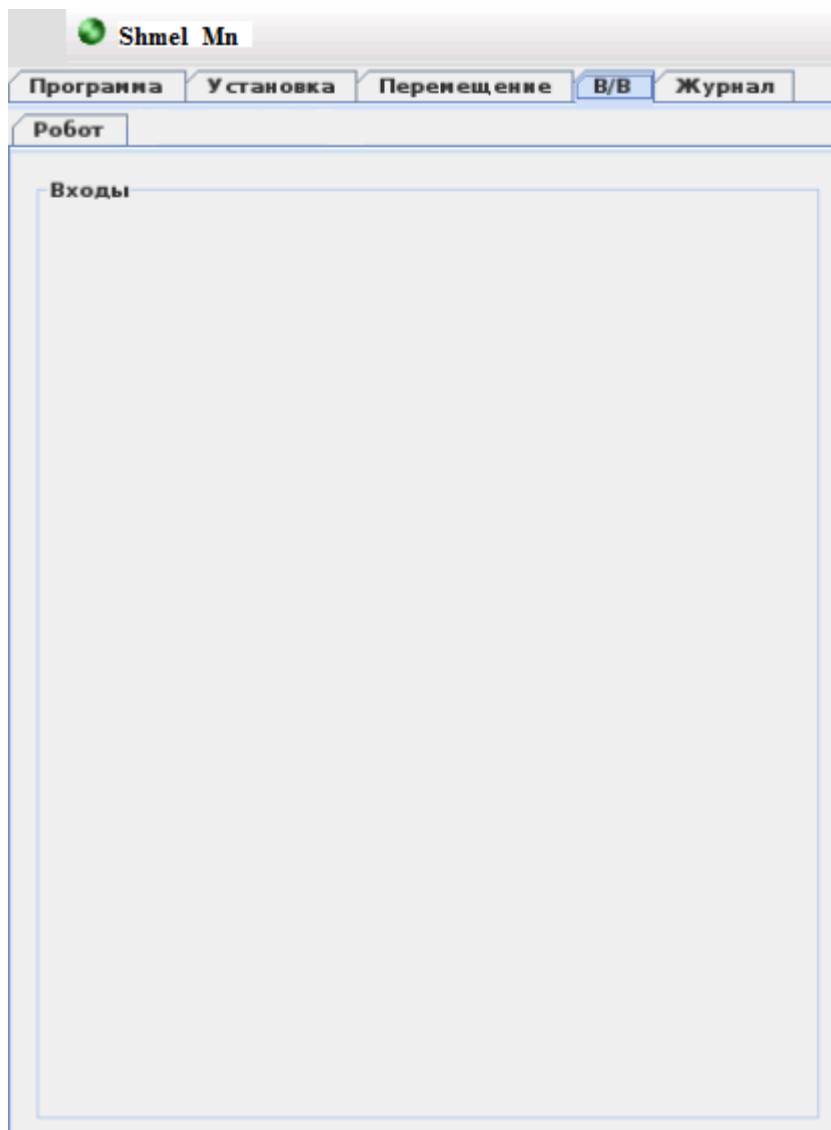


Рисунок 4.5 – Окно с вкладками «программа», «установка», «перемещение», «ввод/вывод», «журнал», «робот»

4.8 После выбора вкладки «Перемещение» открывается окно управления роботом-манипулятором для управления его перемещением. Нажатием на соответствующие кнопки, осуществляется перемещение робота в пространстве, как показано на рисунке 4.6

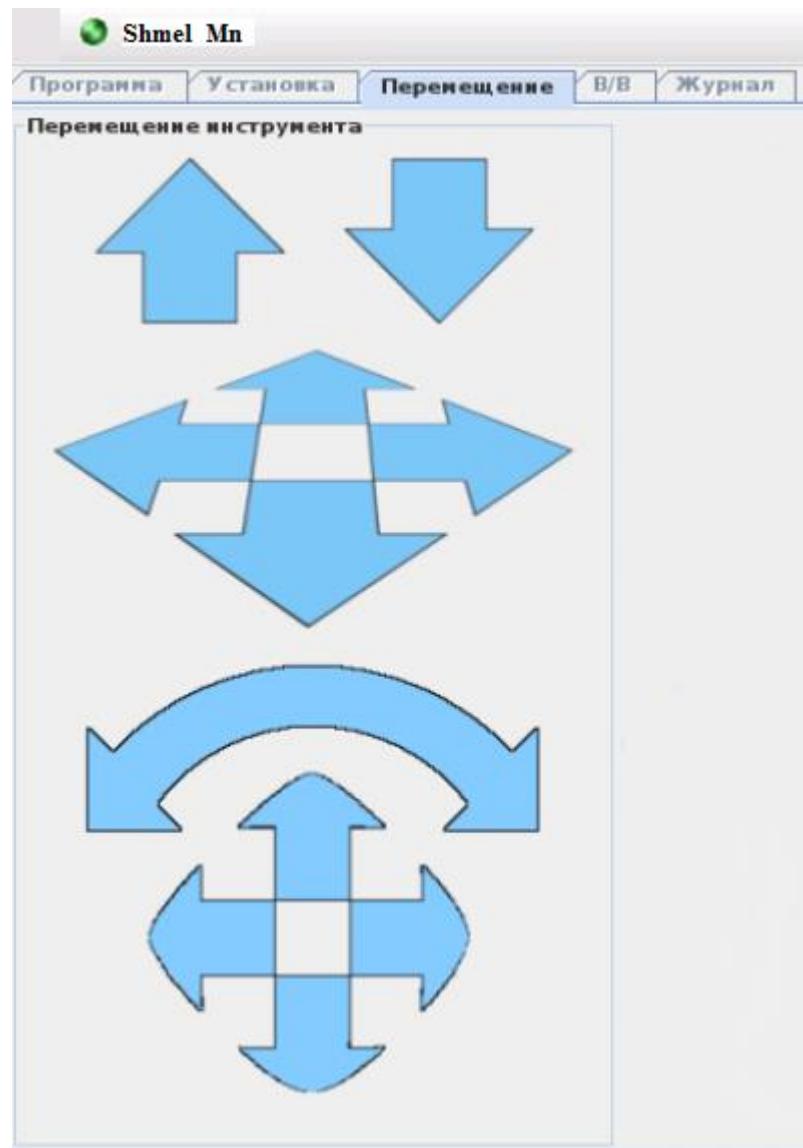


Рисунок 4.6 – Окно управления перемещением роботом-манипулятором

4.9 Кнопки синего цвета отвечают за перемещение робота во всех направлениях. Перемещение осуществляется вместе с УПИ.

4.10 При перемещении оператором робота в режиме реального времени осуществляется вывод информации об измеряемых параметрах, как показано на рисунке 4.7

4.11 После отработки всех необходимых действий, оператор должен завершить работу программы, нажатием соответствующей кнопки во вкладке «Программа», как показано на рисунке 4.8.

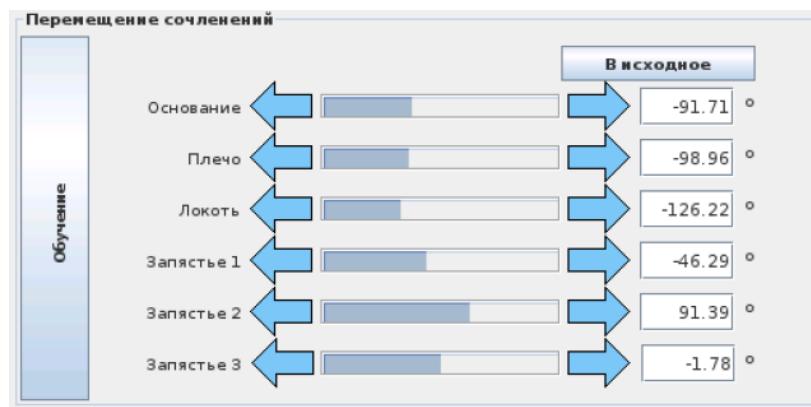


Рисунок 4.7 – Окно измеряемых параметров при перемещении

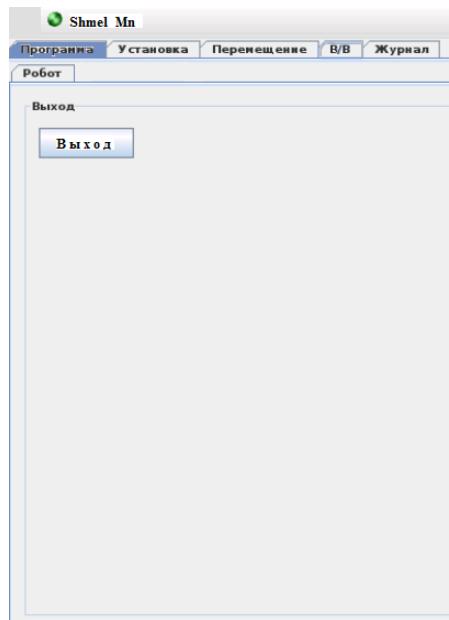


Рисунок 4.8 – Окно выхода из программы

5. СООБЩЕНИЯ ОПЕРАТОРУ

5.1 Сообщения оператору идентифицируются именем модуля и номером сообщения в модуле.

5.2 Программа в процессе своей работы в фоновом режиме ведет протокол обмена с внешними устройствами макета (текстовый файл ShmemManager_Dev.log), в котором автоматически фиксируются переданные устройствам команды и отклики на них, поступающие от драйверов, в том числе - сообщения об ошибках устройств.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

БД	база- данных;
ЗКП УПИ	Зона контроля положения УПИ;
ОС	операционная система;
ПК	персональный компьютер;
ПО	программное обеспечение;
РМ	Робот-манипулятор;
РС УПИ	Реперная системы для обеспечения контроля положения УПИ;
УКПИ	Устройство контроля положения иглы;
УКП УПИ	Устройство контроля положения УПИ;
УПИ	Устройство перемещения игл;
ФО	Фантом опухоли.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ