

Содержание

Введение.....	2
1. Разработка концепции робототехнической системы, предназначенной для автоматизированной многоакурсной микрофокусной рентгенографии авиационных деталей и узлов из ПКМ с применением теплового и механического воздействия на объект.....	3
2. Разработка компонентной модели автоматизированной системы микрофокусной рентгенографии авиационных деталей и узлов из ПКМ с применением теплового и механического воздействия на объект	17
3. Расчет параметров и характеристик источника и детектора рентгеновского излучения с учетом габаритно-массовых ограничений полезной нагрузки и кинематических параметров робототехнической системы многоакурсной съемки объекта.....	42
4. Разработка алгоритма и программы объемного моделирования микроструктуры композиционного материала по неполному набору проекционных образов на основе полученных многоакурсных рентгеновских изображений	64
5. Разработка методики получения двух-, трехмерных рентгеновских изображений с применением теплового и механического воздействия на объект. Расчет параметров и характеристик системы дополнительного теплового и механического воздействия на объект для надежного выявления дефекта.....	77
6. Разработка и изготовление эталонных образцов с различной микроструктурной элементной базы, выполненных из ПКМ с внедренными дефектами	87
Список литературы.....	93

Введение

В последние 20 лет наблюдается широкое применение полимерных композиционных материалов в авиастроении. В частности, американский самолет Boeing 787 Dreamliner и европейский Airbus 350 XWB более чем на 50 % состоят из композиционных материалов (КМ), при этом композиционные материалы широко применяются при изготовлении высоконагруженных элементов как планера, так и двигательной установки. В новом российском самолете МС-21 и двигателе ПД-14 тоже предусмотрено широкое использование композиционных материалов. Использование композиционных материалов позволяет значительно снизить вес, повысить экологические параметры и экономичность самолета. Достижение конкурентного преимущества при внедрении деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) по сравнению с металлическими аналогами возможно только при снижении трудоемкости и обеспечения качества в условиях серийного производства. Это в свою очередь требует высокого уровня автоматизации и роботизации основных технологических процессов при изготовлении деталей, таких как, укладка армирующего материала, механическая обработка, неразрушающий контроль. Именно на неразрушающий контроль и дефектоскопию композитных деталей и узлов приходится порядка 30% трудоемкости технологического процесса изготовления детали. При этом, операции контроля изделий из композиционных материалов требуют высокой квалификации персонала, поскольку определение дефектов в многослойной структуре материала, с учетом изменения схемы армирования на различных участках конструкции осложняют эту работу. Таким образом, разработка программно-аппаратного робототехнического комплекса для контроля деталей и узлов авиационной техники из КМ является чрезвычайно актуальной задачей.

1. Разработка концепции робототехнической системы, предназначенной для автоматизированной многоракурсной микрофокусной рентгенографии авиационных деталей и узлов из ПКМ с применением теплового и механического воздействия на объект

Опыт эксплуатации деталей и узлов из полимерных композиционных материалов авиационных двигательных установок показывает, что наиболее распространенным технологическим дефектом является расслоение. При этом, преимущественно разрушение композитных деталей в процессе их эксплуатации происходит в результате отслоения монослоев в местах локализации дефектов, хотя материал еще обладает достаточным запасом прочности в направлении армирования. Обнаружение таких дефектов в ненагруженных конструкциях, на этапе выходного или пооперационного контроля, а также после заданного эксплуатационного периода, представляет сложную задачу, поскольку при контроле таких дефектов наблюдается эффект «схлопывания», т.е. отсутствие раскрытия. Оперативное выявление такого рода дефекта современными методами неразрушающего контроля не всегда является возможным.

На первом этапе выполнения проекта были проанализированы основные авиационные детали и узлы, выполненных из полимерных композиционных материалов современного авиационного двигателя, такие как: корпусные детали звукопоглощающих конструкций, створки капота, корпус передний, воздухозаборник, дефлектор, патрубки сброса давления, обтекатель реверсивного устройства, силовые шпангоуты, панели газогенератора, решетки реверсивного устройства. Оработка технологии изготовления большинства этих деталей выполнялась при участии исполнителей настоящих исследований. В результате анализа конструктивных и технологических особенностей вышеперечисленных деталей можно выделить четыре основных характерных конструктивных элемента: фланцы, элементы сотовой структуры, элементы оболочек, ребра жесткости. Наиболее распространенными и высоконагруженными из них являются именно фланцы, содержащие участок перегиба слоев (отгибные фланцы). Следует отметить, что четвертый характерный конструктивный элемент – ребра жесткости, в ряде случаев, может иметь перегибы слоя, характерные для фланцевого соединения и будет отличаться только характером приложения нагрузки.

Одним из характерных узлов, в наибольшей степени включающий вышеперечисленные конструктивные элементы, является силовой шпангоут (Рис. 1.1), выбранный в настоящей работе для дальнейших исследований. При этом, дефектоскопия подобных конструкций с построением их

объемного томографического изображения в классической постановке не представляется возможной. Это связано, во-первых, с большими габаритными размерами (диаметр до 2100 мм) и замкнутым контуром конструкции, что не позволяет типовым томографам производить качественное построение объемного изображения с выполнением полного спектра проекций. Во-вторых, в виду сложной слоистой структуры изделий из ПКМ выявление типовых дефектов возможно только при проецировании с углами близкими к направлению армирования материала, что приводит к необходимости получения дополнительных изображений с изменением угла наклона излучателя и приемника. При этом для раскрытия сомкнутых дефектов в комплексе с построением объемного изображения, необходимо производить дополнительное внешнее воздействие на объект контроля, что позволит нагрузить дефектную область и приведет к повышению надежности выявления дефектов.



Рис. 1.1. Внешний вид силового шпангоута

При этом дефектоскопия силового шпангоута с построением объемного изображения становится возможной только, при смещении оси относительно которой производится набор проекционных данных. Это накладывает особые требования к точности позиционирования источника и приемника излучения относительно друг друга, а также исследуемого объекта. При этом важным параметром является угол между центральным пучком лучей и нормалью к плоскости приемника (Рис. 1.2). Величина данного угла влияет на минимальный размер дефекта, который можно распознать на серии снимков.

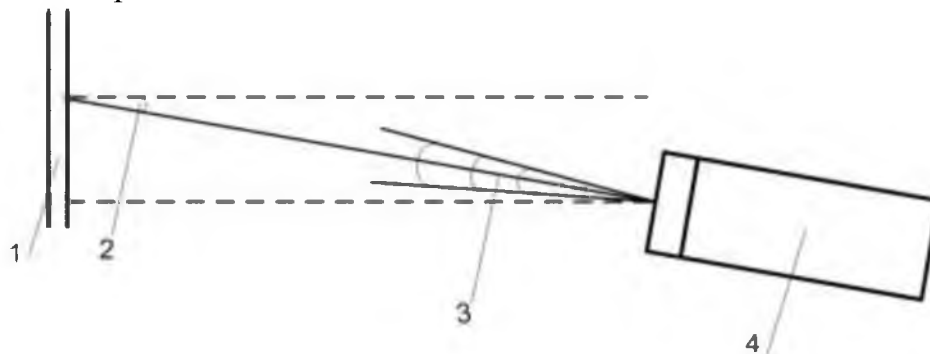


Рис. 1.2. Взаимное расположение источника и приемника излучения: 1 – цифровой детектор излучения, 2 – угол между центральным пучком лучей и нормалью к плоскости детектора, 3 – поток рентгеновского излучения, 4 – источник излучения (рентгеновская трубка).

Таким образом, для автоматизации и унификации процесса многоракурсной микрофокусной рентгенографии необходима разработка робототехнической системы, осуществляющей автоматическое перемещение источника и приемника рентгеновского излучения на определенном расстоянии от поверхности исследуемого объекта.

1.1. Концепция робототехнической системы позиционирования источника и приемника рентгеновского излучения

Разрабатываемая система должна обеспечивать возможность исследования всех заданных типов объектов, которые включают как сравнительно небольшие изделия сложной формы, так и крупногабаритные детали. Достоверное исследование подобных объектов невозможно без применения роботизированных технических средств [1, 2].

Концепция разрабатываемой системы позиционирования включает в себя несколько ключевых компонентов:

1. Манипулятор с установленным на нем микрофокусным рентгеновским излучателем. Манипулятор должен обеспечивать облучение детали с различных ракурсов с соблюдением заданного расстояния. При этом необходимо соблюдать строго перпендикулярную ориентацию излучателя по отношению к поверхности детектора излучения.

2. Рамочная конструкция с направляющими, обеспечивающая позиционирование цифрового детектора рентгеновского излучения по трем координатам и его вращение в двух плоскостях.

3. Большой и малый поворотный стол, на котором закрепляется деталь с помощью набора креплений.

На рисунке 1.3 представлена разработанная компьютерная модель прототипа системы позиционирования.

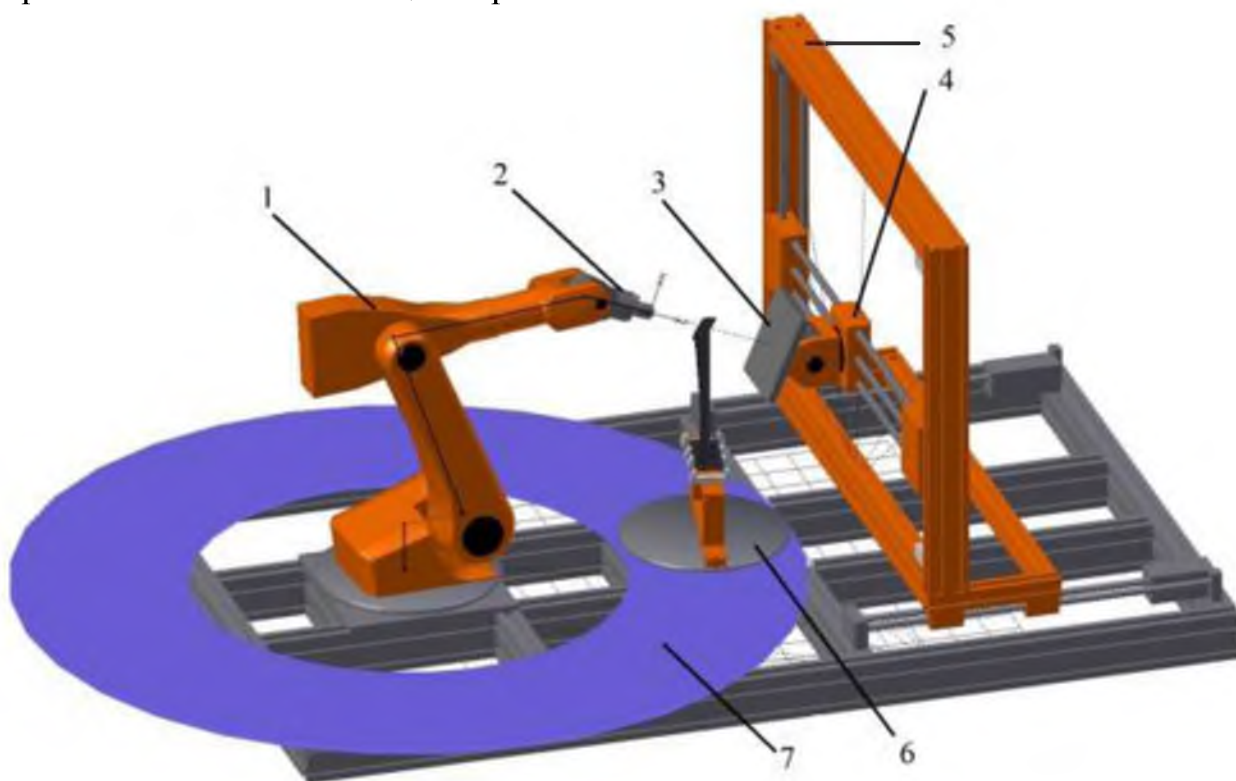


Рис. 1.3. Трехмерная модель прототипа системы позиционирования: 1 – манипулятор; 2 – микрофокусный рентгеновский излучатель; 3 – цифровой детектор рентгеновского излучения; 4 – каретка; 5 – рамочная конструкция с направляющими; 6 – малый поворотный стол; 7 – большой поворотный стол.

Согласно предлагаемой концепции, роботизированный комплекс синхронно перемещает вблизи исследуемого объекта микрофокусный рентгеновский излучатель и цифровой детектор, производя рентгенографию с различных ракурсов. Для обнаружения особых дефектов (не имеющих раскрытие) при проведении контроля на исследуемый объект предполагается

производить тепловое или механическое воздействие, что позволит повысить надежность их выявления.

Предложенная концепция позволит в полной мере реализовать проекционный способ микрофокусной рентгенографии. Как известно, при проекционной микрофокусной рентгенографии исследуемый объект размещают вблизи рентгеновского излучателя, получая на детекторе проекционное увеличение дефекта в несколько раз. Кратность увеличения определяется расстояниями между источником излучения, исследуемым объектом и детектором излучения.

Если габариты исследуемого объекта сопоставимы с размером матрицы цифрового детектора рентгеновского излучения, то достаточно одного кадра для получения проекционного изображения в одной плоскости. В противном случае, для построения проекции детали в одном ракурсе требуется несколько кадров. При этом, перемещая излучатель и детектор вблизи поверхности детали, важно соблюдать угловую ориентацию излучателя и детектора по отношению к детали, расстояния между источником излучения, деталью и детектором. Объекты сложной формы требуют более тщательного исследования, поэтому различные элементы (выступы, торцы) исследуются дополнительно.

Перед началом исследования трехмерная модель сканируемого объекта загружается в программную систему. Далее она разбивается на фрагменты, каждый из которых будет исследован по индивидуальному алгоритму. Системе позиционирования отправляется набор инструкций с координатами для перемещения и список действий, который требуется выполнить в каждой точке (холостой ход, сделать рентгеновский снимок и т.д.).

Согласно представленной концепции, наиболее сложным компонентом системы (с точки зрения реализации механических конструкций и алгоритмов управления) является манипулятор. Манипулятор состоит из силовых элементов конструкции, узлов, включающих механизмы позиционирования звеньев, рентгеновского излучателя, главного контроллера, датчиков положения манипулятора в пространстве и т.д. На рисунке 1.4 показана схема манипулятора с указанием направлений вращения каждого звена. Каждый узел отвечает за угловые перемещения соответствующего звена. Узел 6 также отвечает за управление рентгеновским излучателем, и в нем установлена подсистема контроля расстояния до объекта.

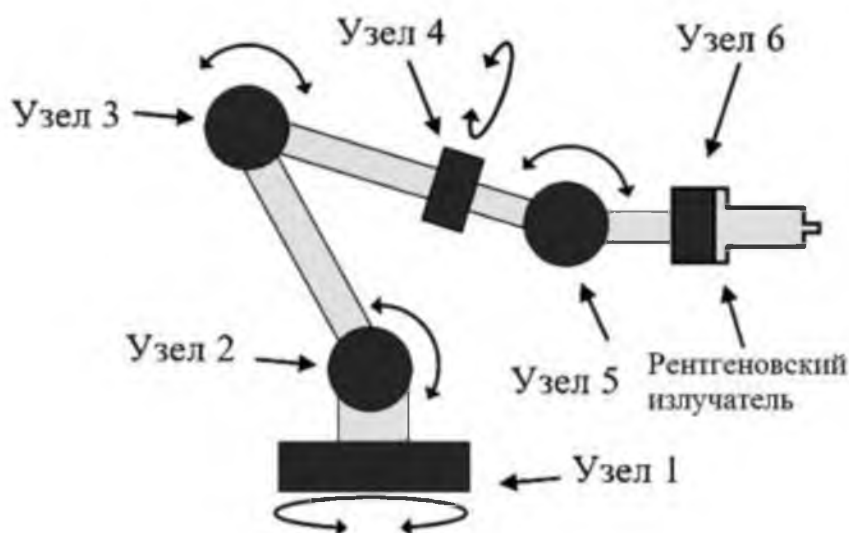


Рис. 1.4. Кинематическая схема манипулятора

Силовые элементы манипуляторов в большинстве случаев изготавливаются из металлов. Использование металлических силовых элементов обосновывается обеспечением высокой прочности и жесткости, что позволяет достичь большой точности позиционирования. Главным их недостатком является большая масса, что влияет на инерционные характеристики системы и формирует особые требования, предъявляемые к креплению и размещению манипулятора. Кроме того, проектирование и изготовление конструкций из металлов является затратным по времени процессом. Поэтому целесообразно при прототипировании использовать различные подходы, позволяющие ускорить разработку. Одним из таких подходов является использование 3D-печати из пластика для изготовления некоторых механических компонентов конструкции. Другим подходом является применение ПКМ в деталях манипулятора. При наличии доступа к определенной производственной базе, это позволит обеспечить достаточную прочность и жесткость отдельных узлов, при снижении массы конструкций. Кроме того, увеличится полезная нагрузка манипулятора.

Для определения рабочей области манипулятора был проведен ряд расчетов на основе специально разработанной модели. Оценка рабочей области основывается на решении задачи прямой кинематики с учетом длин всех плеч и подстановки всех допустимых углов поворота звеньев манипулятора. Решение подобных задач рассматривается в [3, 4]. Были заданы ограничения на вращения каждого звена и шаг, с которым оно может вращаться. Таким образом, было получено облако точек, описывающих всевозможные положения рабочего органа. В первую очередь был получен срез облака точек в плоскости (XZ) (Рис. 1.5), отражающий конечные

положения рабочего органа без учета его угла поворота к исследуемому объекту.

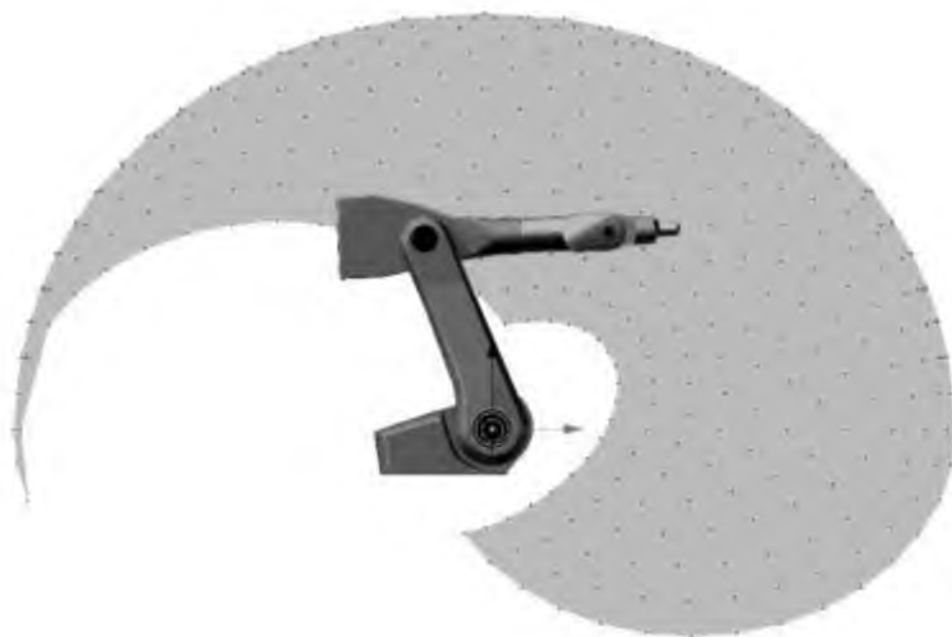


Рис. 1.5. Срез облака точек в плоскости (XZ)

Далее было получено множество срезов, отражающих конечные положения манипулятора с учетом различных углов поворота рабочего органа к поверхности исследуемого объекта. При наложении множества срезов друг на друга получено их объединение (Рис. 1.6).

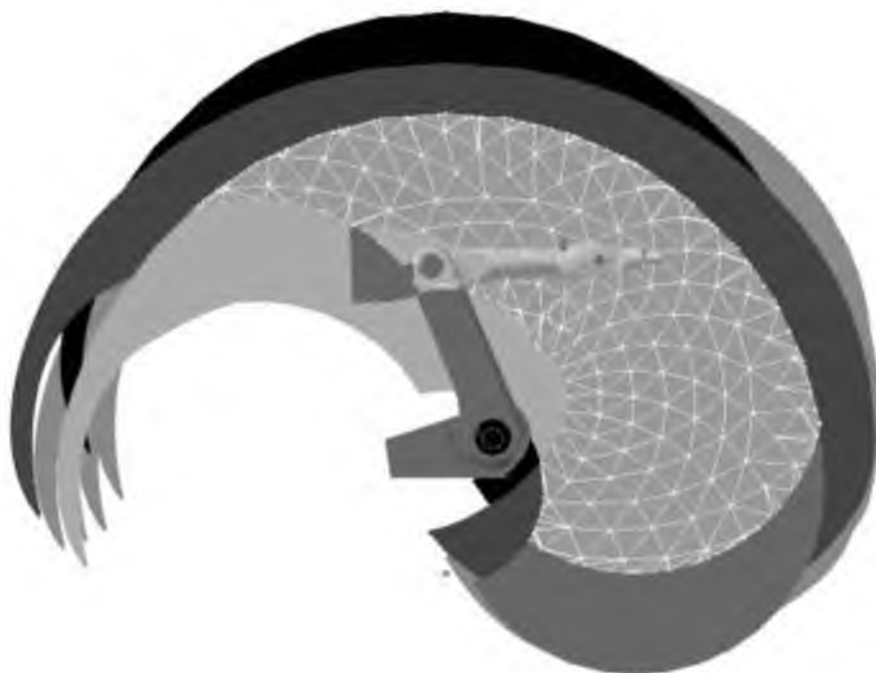


Рис. 1.6. Объединение срезов для различных положений рабочего органа

Таким образом, была апробирована модель для построения рабочей области манипулятора, в которой он может занимать все необходимые

положения для исследования образца заданных размеров. При разработке дальнейших версий прототипа манипулятора и опытного образца их рабочая область будет рассчитываться аналогичным методом – путем подстановки в модель соответствующих длин плеч, допустимых углов поворота каждого звена и требуемых углов поворота рабочего органа по отношению к исследуемому объекту.

Помимо манипулятора одним из ключевых элементов предложенной концепции является устройство, перемещающее детектор рентгеновского излучения. Данное устройство проектируется на базе подхода, используемого в цифровых станках, 3D-принтерах и т.д.

Цифровой детектор рентгеновского излучения устанавливается на специальной каретке, которая обеспечивает его вращение, сама каретка располагается на направляющих и может перемещаться вдоль трех осей. Вращение детектора и перемещения каретки обеспечиваются шаговыми двигателями с редукторами, которые управляются контроллером через драйвер двигателей. Следует отметить, что возможность поворота блока приемника излучения необходима для обеспечения более широких конфигураций позиционирования.

Практическая реализация предложенной концепции позволит делать плоские увеличенные снимки исследуемого объекта под различными углами с последующим построением объемного изображения.

1.2. Концепция системы изменения ориентации исследуемой детали с использованием поворотного стола

В соответствии с представленной концепцией, сканируемый объект должен располагаться между манипулятором и рамочной конструкцией на специальном поворотном столе. Крепление исследуемого изделия к поворотному столу осуществляется с помощью тисочного механизма.

Предполагается использование двух типов поворотных столов. На основании анализа номенклатуры исследуемых объектов, были сформулированы следующие решения, касающиеся использования поворотных столов:

а) для исследования объектов с габаритными размерами, не превышающими 700мм, стол располагается между излучателем и приемником и обеспечивает вращение детали вокруг своей оси (Рис 1.2);

б) для исследования крупногабаритных деталей, преимущественно имеющих цилиндрическую форму и полых внутри (например, кожухов

авиадвигателей, шпангоутов), стол располагается вокруг манипулятора, при этом ось вращения расположена в центре основания манипулятора (Рис. 1.2).

1.3. Концепция системы комплексного воздействия на исследуемый объект

В виду необходимости осуществления раскрытия дефектов реализация дополнительного воздействия может быть осуществлена как точечными методами, так и воздействием на объект в целом. Одним из основных примеров такого воздействия является механическое, которое может осуществляться одним или несколькими зондами, давящими на поверхность объекта. Кроме того, актуальным методом раскрытия дефектов является нагрев, который может быть реализован инфракрасными излучателями (прожекторами).

В рамках разрабатываемой системы предлагается установка направленных бесконтактных нагревательных элементов на манипуляторе вблизи рентгеновского излучателя. Для осуществления механического воздействия предполагается использовать рамку, устанавливаемую на поворотный стол. На данной рамке закрепляются механические зонды, оказывающие точечное давление на определенные участки исследуемого объекта.

1.4. Концепция управления элементами системы позиционирования источника и приемника рентгеновского излучения

Разрабатываемая модель должна иметь возможность задания различных ограничений на перемещения манипулятора, связанные как с его рабочей областью, так и с траекториями движения, например, соблюдение заданного расстояния от точки излучения до сканируемого объекта. При этом необходимо, чтобы процесс позиционирования был достаточно «мягким», быстрым и точным. Кроме того, при сканировании объекта необходимо избегать столкновений, которые могут повредить как сам объект, так и манипулятор. Для позиционирования роботизированного манипулятора в пространстве необходимо решить две задачи: обратную задачу кинематики (инверсной кинематики) и задачу определения столкновений манипулятора с объектом сканирования.

Модель управления детектором строится из аналогичных требований.

Инверсная кинематика (англ. *inverse kinematics*, IK) — это процесс определения конфигураций сочленений манипулятора для достижения необходимой позиции, ориентации и расположения этих объектов, т.е. для

заданной конечной точки вычисляются необходимые углы поворота шарниров таким образом, чтобы удалось достичь этой конечной точки [5].

1.4.1. Общее описание методов и подходов решения обратной задачи кинематики

Как правило, рассматривают два класса методов решения обратной задачи кинематики:

- точные (аналитические);
- приближенные (итерационные).

В данной работе будем использовать итерационные методы, поскольку точные методы позволяют находить решение не для любой кинематической схемы манипулятора.

Обратная задача кинематики рассматривается как задача поиска корня уравнения:

$$f(q) = s^*,$$

где q – обобщенные координаты узлов кинематической цепи, s^* – заданное положение конечного узла цепи.

Перечислим некоторые итерационные методы решения обратной задачи кинематики:

а) группа методов, основанных на использовании матрицы Якоби, которая представляет собой матрицу частных производных уравнений кинематики по обобщенным координатам всей системы цепи относительно ее конечного узла. [1, 6] К ним относят:

- метод Ньютона [1], для которого последующая обобщённая координата связана с предыдущей соотношением

$$q_{k+1} = q_k - \alpha_k \cdot J^{-1}(q_k) \cdot f(q_k),$$

где $J(q_k)$ – матрица Якоби, $\alpha_k < 1$ – скалярная величина постоянного или переменного шага;

- метод Левенберга – Марквардта [7], для которого последующая обобщённая координата связана с предыдущей соотношением

$$q_{k+1} = q_k - \alpha_k \cdot [J^T \cdot J + \alpha_{2k} \cdot E]^{-1} \cdot J^T \cdot f(q_k),$$

где E – единичная матрица, α_{2k} – некоторый регуляризирующий скалярный параметр;

- методы нелинейного программирования [8];

б) последовательный метод Монте-Карло (Sequential Monte Carlo Method, SMCM) основан на принципе выборочного обследования, при использовании которого обратная задача кинематики решается с помощью прямой задачи и представляется в виде «скрытой» Марковской модели, где

«скрытое» состояние определяется параметрами, описывающими узел кинематической цепи [9];

в) метод координатного спуска (Cyclic Coordinate Descent, CCD) [10] является итеративным эвристическим методом поиска, на каждой итерации которого происходит изменение параметров узла и оценивание того, насколько хорошо приблизились к конечной точке;

г) метод триангуляции (Triangulation Inverse Kinematics) [11], алгоритм которого использует последовательно правило косинусов для расчета каждого угла сочленения между ребрами, начиная с начального узла цепи;

д) метод прямого и обратного следования (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics, FABRIK) [12] (см. 1.4.2).

Проанализировав эти методы, можно сделать следующие выводы.

Методы использования матрицы Якоби (метод Ньютона, метод Левенберга – Марквардта, метод нелинейного программирования) при большом числе степеней свободы (большом количестве узлов) требуют слишком много времени на вычисления, что затрудняет их использование в режиме реального времени.

Метод SMCМ требует обязательного предварительного обучения модели, что в условиях использования будущей системы в режиме реального времени невозможно.

Методы CCD и триангуляции разработаны также для простых кинематических цепей. При наличии нескольких ветвлений (цепей) возможно применение этих методов путем расчленения механизма на несколько простых цепей и решения обратной задачи кинематики отдельно для каждой цепи, однако, при этом не учитывается взаимовлияние частей механизма, что приведет к дополнительному согласованию получаемых решений.

Метод FABRIK – наиболее быстрый из методов, рассмотренных выше. Метод позволяет решать обратную задачу кинематики для систем с несколькими ветвлениями и применять ограничения для каждой точки сочленения манипулятора.

Итоги анализа методов представлены в таблице (Таблица 1.1).

Таблица 1.1. Сравнение методов решения обратной задачи кинематики

Критерии Методы	Скорость работы метода	Сложность реализации метода	Точность	Система ограничений
Матрица Якоби	Низкая	Низкая	Высокая	Отсутствует
Метод Ньютона	Низкая	Низкая	Средняя	Отсутствует
Метод нелинейного программирования	Низкая	Высокая	Средняя	Отсутствует
Метод SMCM	Средняя	Низкая	Низкая	Отсутствует
Методы CCD	Средняя	Средняя	Средняя	Есть
Метод триангуляции	Низкая	Средняя	Средняя	Отсутствует
Метод FABRIK	Высокая	Средняя	Высокая	Есть

Таким образом, метод FABRIK является наиболее перспективным для дальнейших исследований.

1.4.2. Метод прямого и обратного следования

Рассмотрим принцип работы метода FABRIK [12].

1.4.2.1. Искусственная модель манипулятора

Манипулятор моделируется как цепь, состоящая из твёрдых узлов, сопряженных друг с другом рёбрами. Все рёбра являются компонентами, связанными с движением: они ограничивают перемещения в пределах некоторого угла относительно соседних рёбер. Каждое перемещение и/или вращение ребра в цепи влияет на все последующие элементы. Цепь можно формализовать следующим образом: всякий узел без дочерних элементов следует понимать конечной точкой; для каждой конечной точки цепи может быть сформировано движение обратно по цепи, от потомка к родителю до тех пор, пока не будет найден корневой узел цепи (начало цепи). По определению, в задаче IK предполагается статичность корневого узла.

1.4.2.2. Суть метода FABRIK

В методе FABRIK используется процесс обратного и прямого следования, в результате которого происходит обход всей цепи и перерасчет позиций узлов. За счет минимизации ошибки позиции конечного узла достигается плавность хода всего манипулятора. Этот метод, в отличие от преобразования вращений, обращает задачу поиска позиции узла в задачу

поиска точки на прямой, следовательно, экономятся вычислительные ресурсы.

Предположим, что множество p_1, \dots, p_n является множеством позиций узлов манипулятора. При этом p_1 является корневым узлом, а p_n является конечным узлом. Метод FABRIK представлен в графической интерпретации полного цикла на рисунке 6 с одной целевой точкой t и четырьмя узлами в цепи. Рассмотрим полный цикл алгоритма на рисунке 1.7:

- Начальная позиция манипулятора и цели (Рис. 1.7, а).
- Двигаем конечный узел p_4 к цели (Рис. 1.7, б).
- Обнаруживаем позицию p'_3 , лежащую на линии между позициями p'_4 и p_3 , на дистанции d_3 от точки p'_4 (Рис. 1.7, в).
- Повторяем для всех узлов (Рис. 1.7, г).
- Вторая стадия алгоритма: передвигаем корневой элемент с позиции p'_1 на его начальную позицию (Рис. 1.7, д).
- Повторяем для всех узлов, но на этот раз начинаем с базы и двигаемся к конечному узлу (Рис. 1.7, е).

Алгоритм повторяется до тех пор, пока позиция конечного элемента не приблизится к цели на достаточное расстояние.

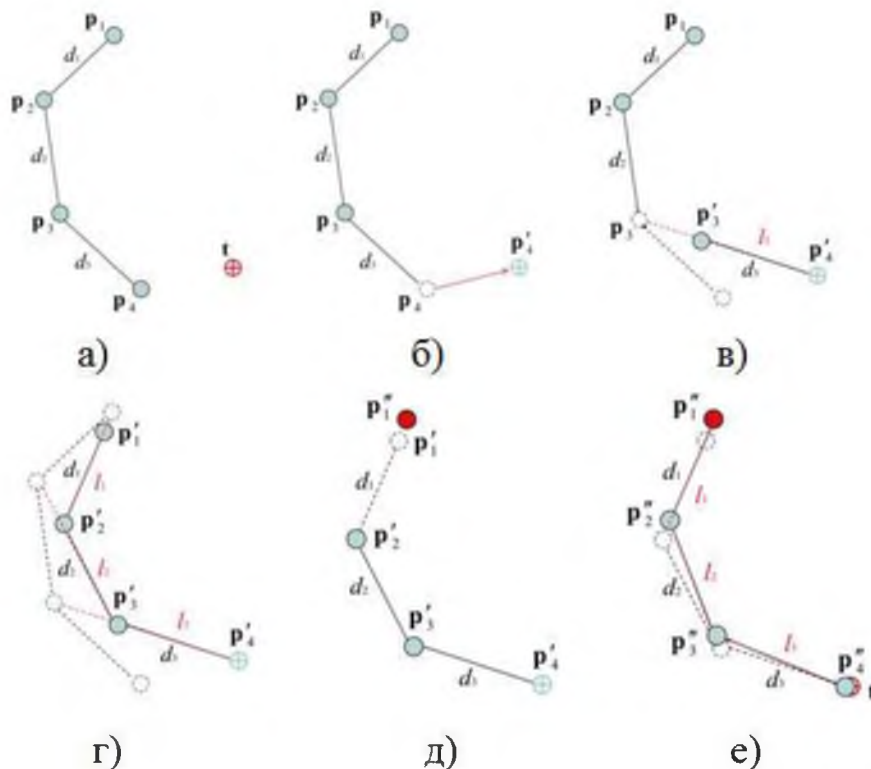


Рис. 1.7. Графическая интерпретация метода FABRIK

1.4.3. Ограничители

Каждый узел цепи характеризуется тремя степенями свободы. Вращение узла может быть characterized как «простое вращение» (2

степени свободы, рисунок 1.8, а,б), которое отражает его конечную позицию, и вращение вокруг собственной оси (1 степень свободы).

Ограничение характеризуется в виде эллипса, который образуется в результате вращения ребра d_1 относительно d_2 (Рис. 1.8, в).

Разделив перемещение узла на две фазы (собственно перемещение, рисунок 1.9 в, ж, и вращение, рисунок 1.9 г, и), и применив к ним ограничивающие эллипсы, можно управлять положением узла. Ограничения при этом не повлияют на сходимость алгоритма.

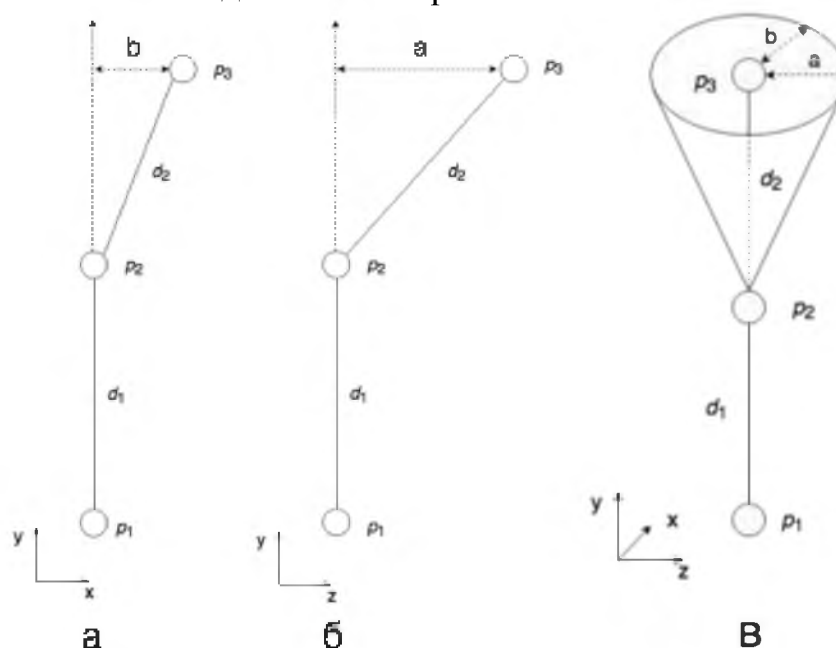


Рис. 1.8. Графическое представление ограничений в методе FABRIK

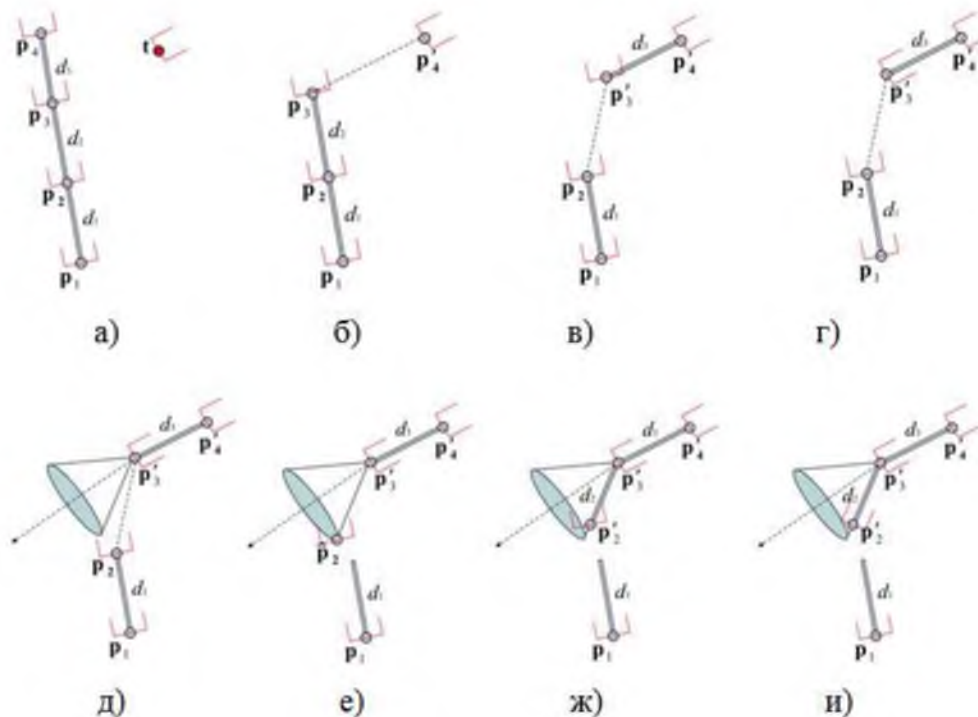


Рис. 1.9. Графическая интерпретация применение ограничителей в методе FABRIK

Рассмотрим полный цикл алгоритма с применением ограничителей на рисунке 1.9:

- Начальные конфигурации манипулятора и цели (Рис. 1.9, а).
- Двигаем конечный узел p_4 к цели и ориентируем p_4 по направлению цели (Рис. 1.9, б). Получили позицию p'_4 .
- Вычисляем позицию p'_3 , лежащую на линии между позициями p'_4 и p_3 , на дистанции d_3 от точки p'_4 (Рис. 1.9, в).
- Переориентируем узел на позиции p'_3 таким образом, чтобы он смотрел вдоль ребра, соединяющего p'_3 и p'_4 (Рис. 1.9, г).
- Вычисление ограничивающего эллипса: разрешённые позиции находятся в затенённом участке. Ни одна из вершин на этом этапе не передвигается (Рис. 1.9, д).
- Узел p_2 перемещается на позицию \hat{p}_2 , которая является ближайшей позицией на затенённом эллипсе. Таким образом новая позиция \hat{p}_2 будет всегда лежать в допустимых пределах (Рис. 1.9, е).
- Двигаем узел \hat{p}_2 в точку p'_2 , чтобы сохранить длину ребра (Рис. 1.9, ж).
- Вращаем p'_2 , чтобы удовлетворить ограничение ориентации (Рис. 1.9, и).

Эта процедура повторяется для всех узлов, в прямом и обратном порядке. При этом ограничение «эллипс» является характеристикой ребра, а не узла.

Таким образом, рассмотрен быстрый алгоритм расчета траектории движения манипулятора.

В разделе описана концепция робототехнической системы, предназначенной для автоматизированной многоракурсной микрофокусной рентгенографии авиационных деталей и узлов из ПКМ с применением теплового и механического воздействия на объект.

2. Разработка компонентной модели автоматизированной системы микрофокусной рентгенографии авиационных деталей и узлов из ПКМ с применением теплового и механического воздействия на объект

2.1. Компонентная модель подсистемы позиционирования микрофокусного рентгеновского излучателя

Согласно концепции, для позиционирования микрофокусного рентгеновского излучателя используется шестизвенный роботизированный

манипулятор. Шесть звеньев обеспечивают позиционирование излучателя в трех координатах и его вращение в трех плоскостях.

За позиционирование звеньев манипулятора в пространстве отвечает соответствующая подсистема, её структурная схема представлена на рисунке 2.1. В составе управляющей программы на ПК имеется модуль расчета инверсной кинематики. Данный модуль на базе математической модели манипулятора и требуемой траектории (набора координат) рассчитывает углы отклонения каждого звена манипулятора. Ключевым элементом подсистемы является главный контроллер (ГК), который получает от управляющей программы список инструкций о смене положения рентгеновского излучателя и детектора, управления рентгеновским излучателем и т.д. ГК передает каждому узлу пакет с данными об углах, на которые требуется повернуть каждое звено, так же ГК запрашивает у узлов их текущее положение. Для организации взаимодействия между ПК и контроллерами в составе системы был разработан протокол обмена данными. Данные передаются по интерфейсу RS-232 или RS-485, в зависимости от реализации.



Рис. 2.1. Структурная схема подсистемы контроля положения

Внешний вид подсистемы позиционирования микрофокусного рентгеновского излучателя показан на рисунке 2.2. Подсистема включает в себя 6 независимых узлов, обменивающихся данными с главным контроллером. Первый узел отвечает за вращение основания манипулятора,

узлы 2,3,4,5 отвечают за контроль угловой ориентации 1,2,3,4 плеч манипулятора соответственно. Шестой узел включает в себя микрофокусный рентгеновский излучатель, комплекс датчиков контроля расстояния до объекта, видеокамера, направленные бесконтактные нагреватели (для теплового воздействия на объект контроля).

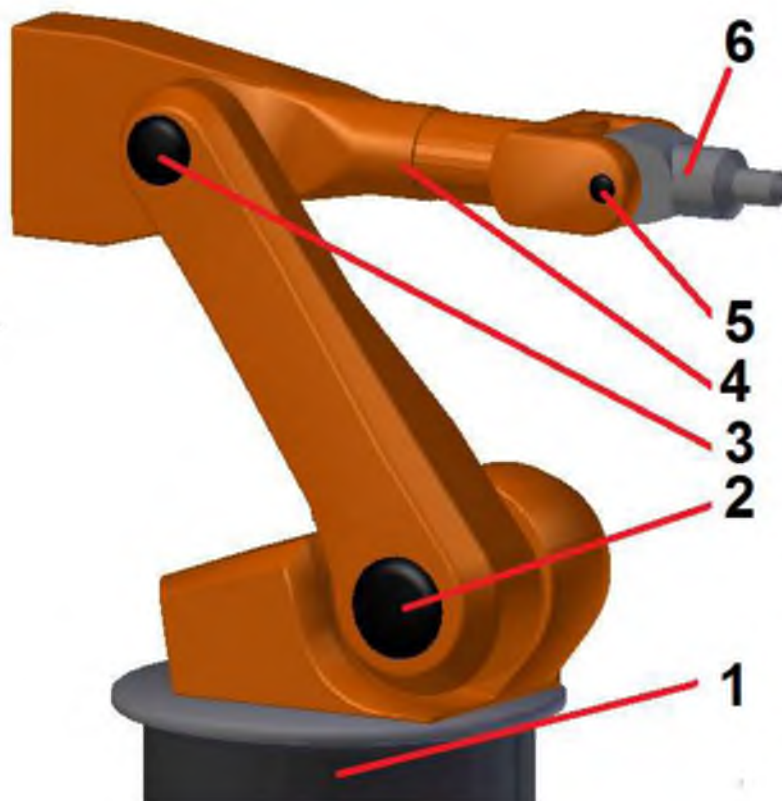


Рис. 2.2. Внешний вид подсистемы позиционирования микрофокусного рентгеновского излучателя: 1 – вращающееся основание манипулятора; 2,3,4,5 – плечи манипулятора; 6 – плечо с микрофокусным рентгеновским излучателем.

Каждый узел (звено) включает в себя: контроллер, двигатель с редуктором и драйвером и комплекс датчиков, включающий: датчики угла поворота, акселерометры, концевые выключатели (типовая схема узла представлена на рисунке 2.3). На контроллер узла ложится задача обмена данными с главным контроллером, измерение текущего углового положения звена по данным от датчиков (энкодеров, акселерометров и концевых выключателей) и управление двигателем через драйвер. Энкодер устанавливается на оси вращения плеча для контроля углового положения. Дополнительно угол наклона контролируют акселерометры, установленные внутри плеча. Крайние положения отклонения плеча контролируются концевыми выключателями (подобные системы описаны в [3, 4]).

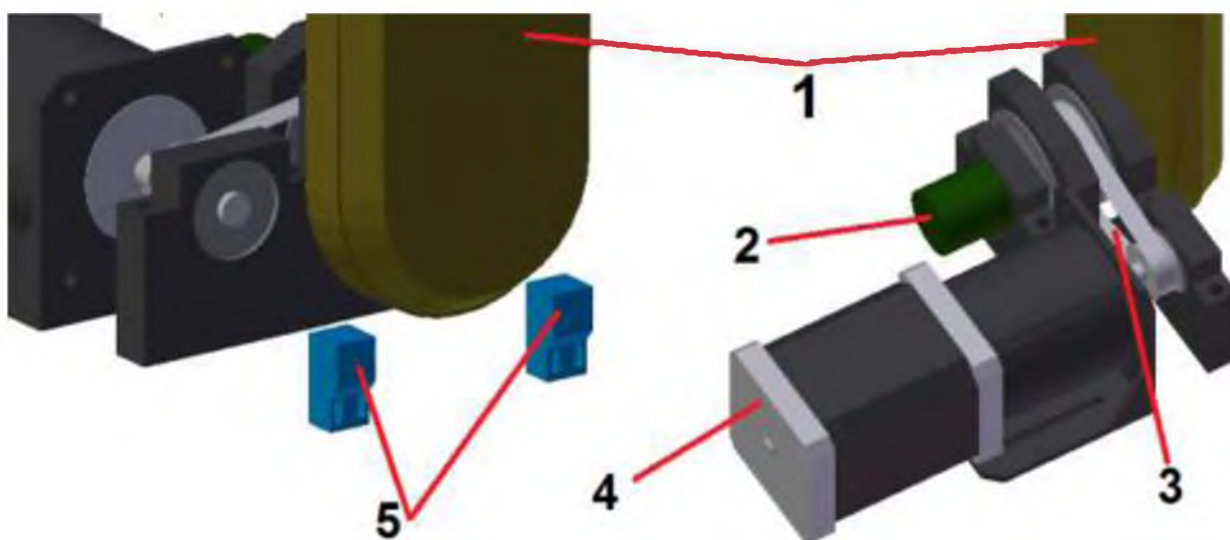


Рис. 2.3. Схема типового узла: 1 – плечо манипулятора; 2 – энкодер; 3 – ременная передача; 4 – двигатель с редуктором; 5 – концевые выключатели.

Для каждого подвижного звена манипулятора характерна индивидуальная конструкция и электро-механические компоненты, так в основании манипулятора (Рис. 2.2, поз. 1), а так же в первом плече (Рис. 2.2, поз. 2) устанавливаются более мощные биполярные шаговые двигатели PL86H113-D14, шаг 1.8° , ток потребления до 4,2 А, предустановленный понижающий редуктор 100:1. Также для этих звеньев манипулятора характерно использование ременной передачи, позволяющей перенести двигатель от оси вращения звена, это необходимо для установки дополнительных элементов жесткости.

Для второго и третьего плеча манипулятора (Рис. 2.2, поз. 3-4) устанавливаются биполярные шаговые двигатели типа nema 23 - PL57HD110-D8, шаг 1.8° , ток потребления до 4 А, предустановленный понижающий редуктор 100:1.

Вращение четвертого плеча и детектора (Рис. 2.2, поз. 5-6) обеспечивают два биполярных шаговых двигателя типа nema 17 – 42HS4013A4-XG100, шаг 1.8° , ток потребления до 1,5А, предустановленный понижающий редуктор 100:1.

2.2. Компонентная модель подсистемы позиционирования цифрового детектора рентгеновского излучения

Цифровой детектор рентгеновского излучения расположен на portalной конструкции с направляющими. Такая конструкция обеспечивает большую жесткость, точность позиционирования и стабильность положения детектора во время работы системы. Недостатком конструкции является

невозможность манипуляций рабочим телом в непосредственной близости от исследуемого объекта, что не требуется при заявленных режимах работы (расстояние от детектора до объекта не менее 50 см).

Внешний вид портала для позиционирования цифрового детектора рентгеновского излучения представлен на рисунке 2.4. Конструкция позволяет перемещать каретку, на которой установлен детектор, вдоль трех осей благодаря линейным направляющим, сама каретка оснащена модулями, которые обеспечивают поворот каретки вдоль двух осей, таким образом возможно достичь перпендикулярной ориентации с излучателем. Конструкция собрана из конструкционного алюминиевого профиля и готовых деталей, применяемых в конструкциях станков с ЧПУ.



Рис. 2.4. Внешний вид портала для позиционирования цифрового детектора рентгеновского излучения: 1 – элементы перемещения по оси X, 2 – элементы перемещения по оси Z, 3 – элементы перемещения каретки по оси Y, 4 – цифровой детектор рентгеновского излучения и элементы его вращения.

Линейные перемещения вдоль осей X, Y и Z обеспечивают соответствующие модули (Рис. 2.5).

Типовой модуль линейного перемещения включает следующие компоненты:

- шаговый двигатель;
- крепление шагового двигателя;
- соединительная муфта;
- шарико-винтовая передача (ШВП);
- линейные модули перемещения;
- рельсовая направляющая;
- бесконтактный концевой выключатель.

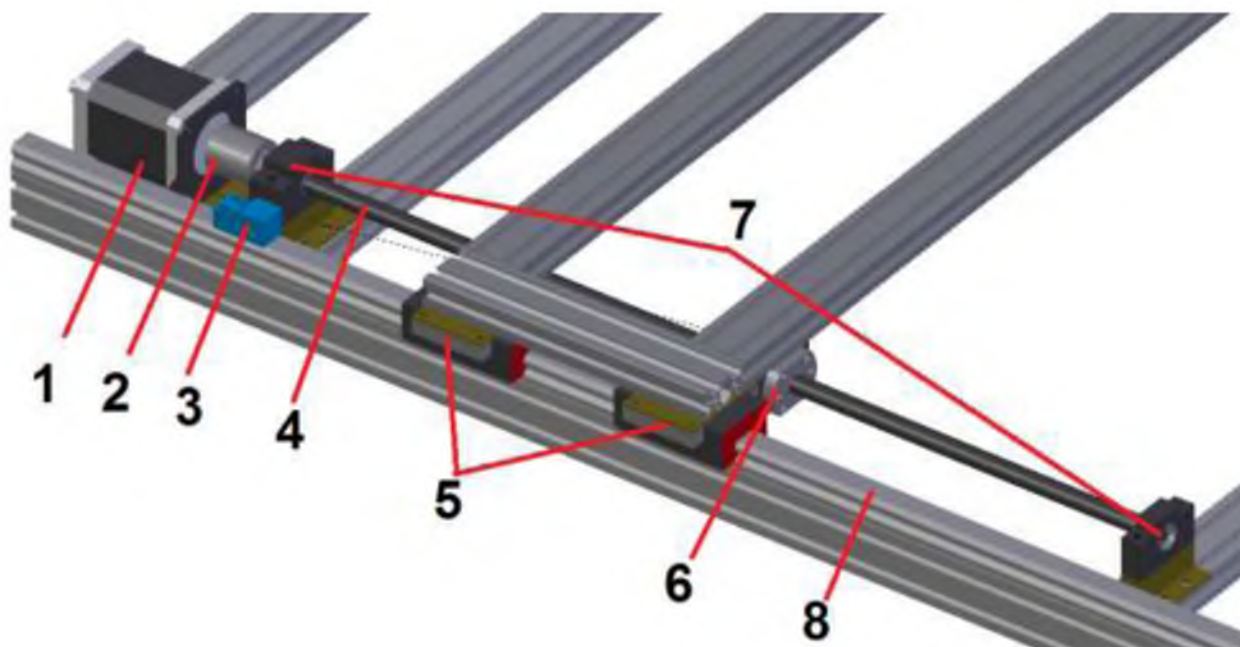


Рис. 2.5. Внешний вид модуля перемещения по оси X: 1 – шаговый двигатель с креплением, 2 – соединительная муфта, 3 – бесконтактный концевой выключатель, 4 – винт ШВП, 5 – линейные модули перемещения, 6 – гайка ШВП с держателем, 7 – подшипниковые опоры ШВП, 8 – рельсовая направляющая.

В качестве двигателя выбраны биполярные шаговые двигатели типа пета 23 - PL57H110-D8, шаг $1,8^\circ$, ток потребления до 3А, валы с обеих сторон, на случай необходимости установки дополнительного оборудования (ручек для ручного вращения, энкодеров и т.д.). Для двигателя используется стандартное крепление, обеспечивающее достаточную жесткость крепления на раму основания.

Шарико-винтовая передача (ШВП) является типовым решением в станках ЧПУ для превращения вращательного движения двигателя в поступательное, для целей проекта и габаритов наиболее подходящей является ШВП типоразмера 1204, класс точности С7. Передача включает в себя несколько узлов: винт с гайкой (PL1204-1), держатель гайки (BSH1204), подшипниковые опоры (типа EK8 и BF6), в которых закрепляется винт. Для перемещений по оси X используется винт длиной 600мм, обеспечивающий перемещения каретки на 500мм; для осей Y и Z используется винт 1000мм, обеспечивающий перемещения кареток на 800мм.

Для соединения ШВП и двигателя используется компенсирующая жесткая алюминиевая соединительная муфта DR-30-6.35-8. Для линейных перемещений с минимальным трением выбраны профильные рельсовые направляющие фирмы LHA - GHR20 с кареткой.

При включении системы производится определение «начального положения», для этого производится поочередное перемещение по всем осям, пока не сработает концевой выключатель (датчик крайнего положения). Для контроля концевых положений линейных перемещений установлены концевые датчики индуктивного типа SN04-N, срабатывающие на алюминиевый каркас приближающейся каретки.

На рисунке 2.6 показан внешний вид цифрового детектора рентгеновского излучения, установленного на каретке, перемещающейся по оси Y.

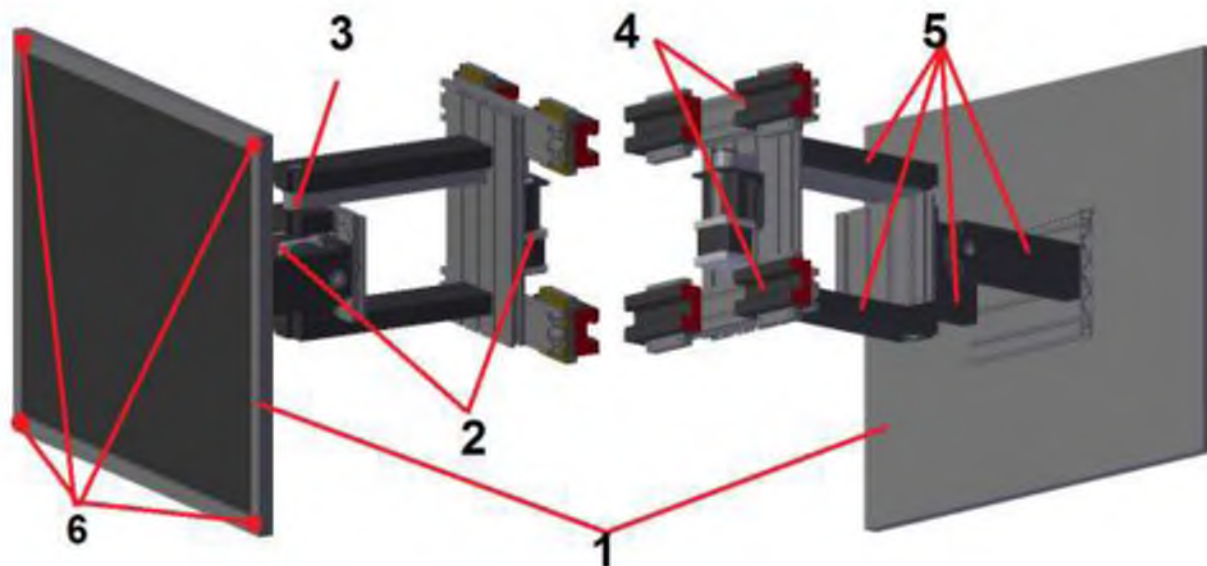


Рис. 2.6. Внешний вид цифровой детектор рентгеновского излучения и модулей его вращения: 1 – цифровой детектор рентгеновского излучения; 2 – шаговые двигатели с редуктором; 3 – зубчато-ременная передача; 4 – линейные модули перемещения по оси Y; 5 – опорные крепления с шарикоподшипником; 6 – датчики контроля расстояния.

Для обеспечения соосности с рентгеновским излучателем необходимо вращение детектора в двух плоскостях. При этом может не соблюдаться горизонтальная ориентация детектора, но это и не требуется, корректировка проекции изображения производится программно исходя из текущих координат и положения детектора.

Контроль расстояния до исследуемого объекта контролируется программно, оно высчитывается исходя из знаний о текущем положении каждого модуля позиционирования. Для предотвращения внештатных ситуаций, которые, например, могут возникать при наличии в области сканирования объектов, не предусмотренных программой сканирования, по углам детектора установлены оптические датчики контроля расстояния (Рис. 2.6, поз.6) типа GP2Y0A21YK0F фирмы Sharp.

Вращение детектора обеспечивают два биполярных шаговых двигателя типа nema 17 – 42HS4013A4-XG100, шаг $1,8^\circ$, ток потребления до 1,5А, предустановленный понижающий редуктор 100:1. Детектор закреплен на каретке с помощью алюминиевого профиля и стоек с подшипниками. Для вращения по оси X шаговый двигатель напрямую вращает детектор, а для вращения по оси Z шаговый двигатель вращает площадку с детектором через зубчато-ременную передачу.

Для управления подсистемой позиционирования цифрового детектора рентгеновского излучения используется плата-контроллер Arduino mega2560, которая получает данные о требуемом положении детектора. Контроллер подсистемы обеспечивает сбор и обработку данных с датчиков, управление двигателями, ответы на команды главного контроллера.

Для управления шаговыми двигателями используется 2 многоканальных драйвера шаговых двигателей на 4 оси (3А/30В/100кГц) производства Purelogic R&D - PLC330-G2, обеспечивающие микрошаг 1/2/8/16, опто-входы, таймер СОЖ, конвертор ШИМ-напряжение, демпфер. Первый драйвер управляет парами двигателей для перемещения по осям X и Z. Второй драйвер управляет двигателями для перемещения по оси Y и вращения детектора. Питание подается от общего (для всей системы) блока питания S-600-24 (24В, 600А).

2.3. Компонентная модель подсистемы изменения ориентации исследуемой детали с использованием поворотного стола

Для повышения количества доступных ракурсов и универсальности всей системы в целом, исследуемый объект закрепляется на поворотном столе. Ввиду того, что предполагается исследовать как сравнительно

небольшие, так и крупногабаритные объекты, в системе предусмотрено использование двух поворотных столов: малого и большого.

При необходимости исследования деталей с габаритными размерами, не превышающими 700мм (лопатки, створки и т.д.), между излучателем и детектором устанавливается малый поворотный стол (Рис. 2.7). Стол оснащен универсальными креплениями, на которые могут быть установлены тисочные механизмы для фиксации исследуемого объекта. Также на поворотный стол может быть установлена рамочная конструкция, позволяющая оказывать механическое воздействие на исследуемый объект. В основании стола присутствует механизм, позволяющий автоматически вращать объект вокруг своей оси на требуемый угол.

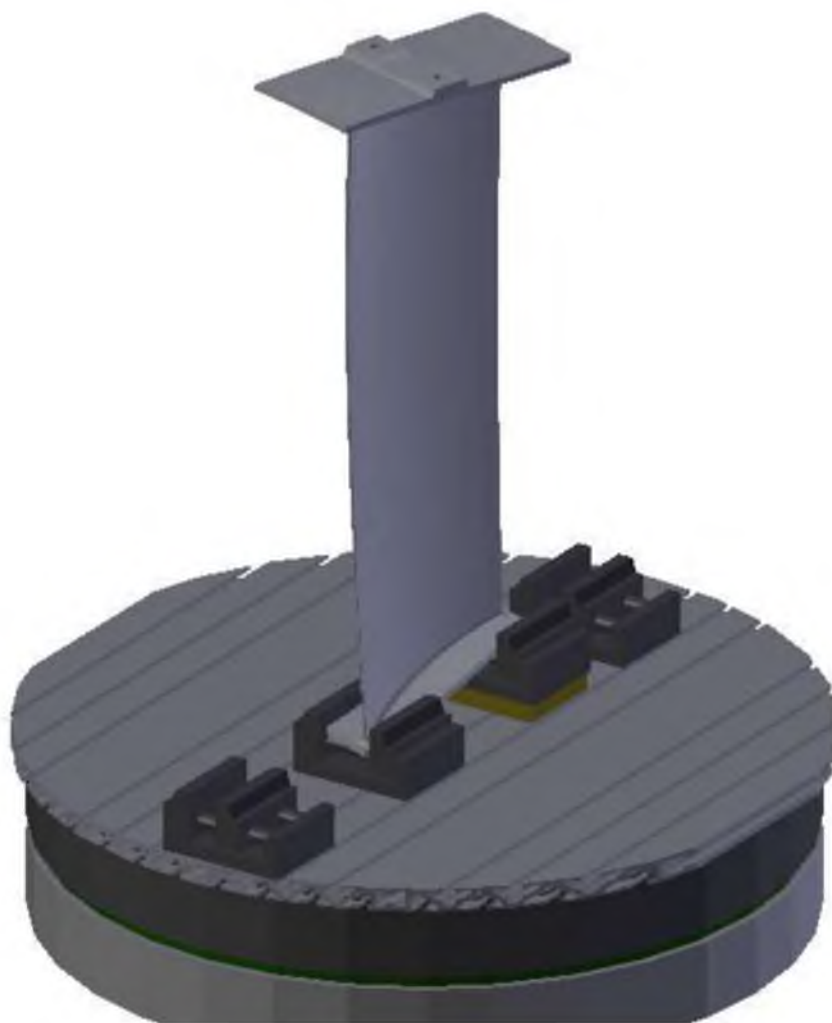


Рис. 2.7. Внешний вид малого поворотного стола

Исследование крупногабаритных деталей имеющих цилиндрическую форму и полых внутри (шпангоут, корпусные конструкции с сотовой структурой и т.д.) возможно, благодаря большому поворотному столу (Рис. 2.8), который устанавливается так, что манипулятор оказывается в его центре.

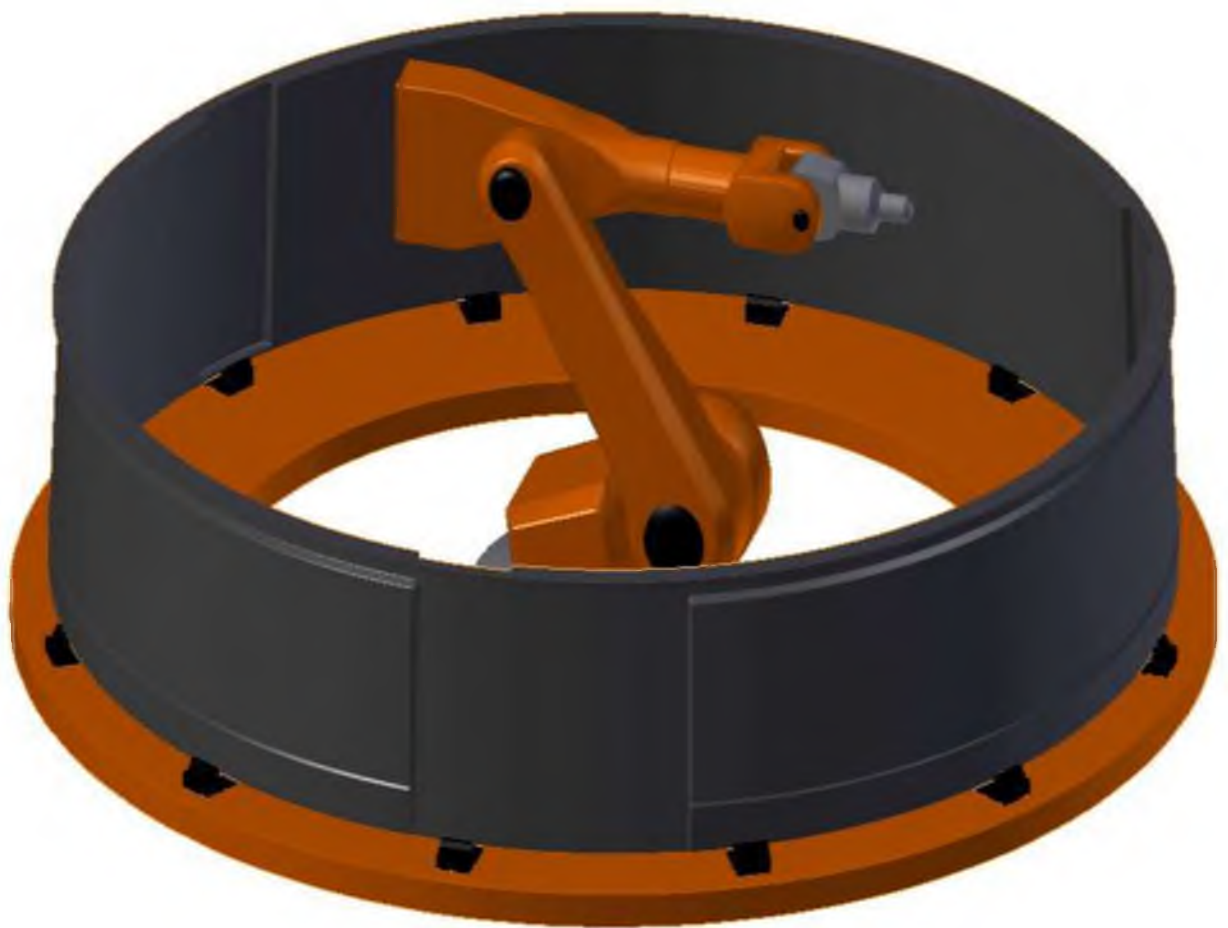


Рис. 2.8. Внешний вид большого поворотного стола

2.4. Компонентная модель программного обеспечения

2.4.1. Функциональная схема разрабатываемой системы для управления роботизированным манипулятором

На рисунке 2.9 представлена функциональная модель будущей системы управления позиционированием манипулятора

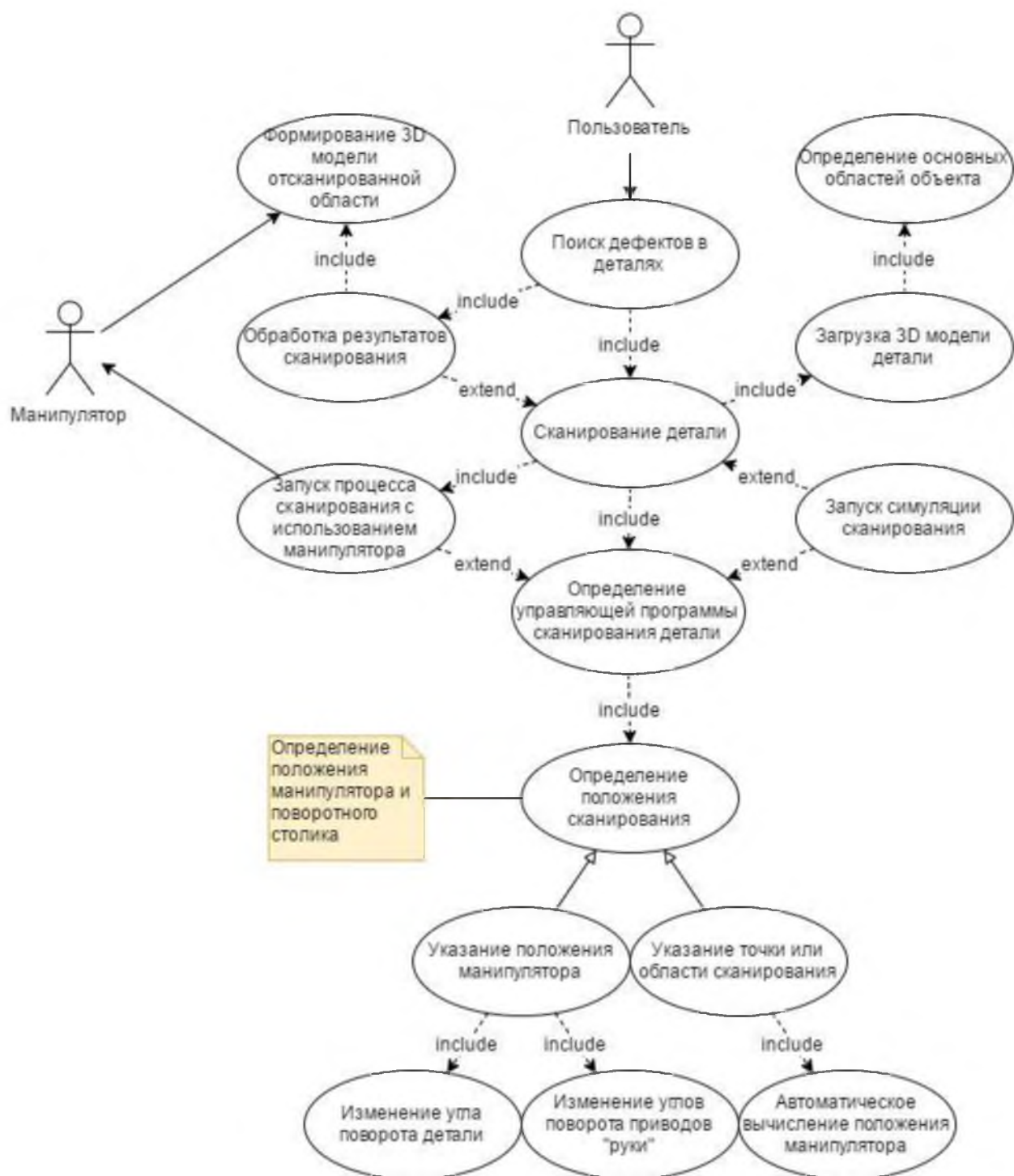


Рис. 2.9. Диаграмма прецедентов системы управления манипулятором

Данная диаграмма представляет собой концепцию возможностей, которыми должен обладать пользователь для выполнения задачи нахождения дефектов в деталях с использованием робототехнического комплекса.

2.4.2. Алгоритм построения маршрута позиционирования манипулятора

Во время работы комплекса могут происходить столкновения манипулятора с исследуемым объектом, поэтому необходимо разработать

алгоритм построения маршрута позиционирования манипулятора, при котором будут отсутствовать какие-либо столкновения. Блок-схема алгоритма построения маршрута позиционирования манипулятора приведена на рисунке 2.10.

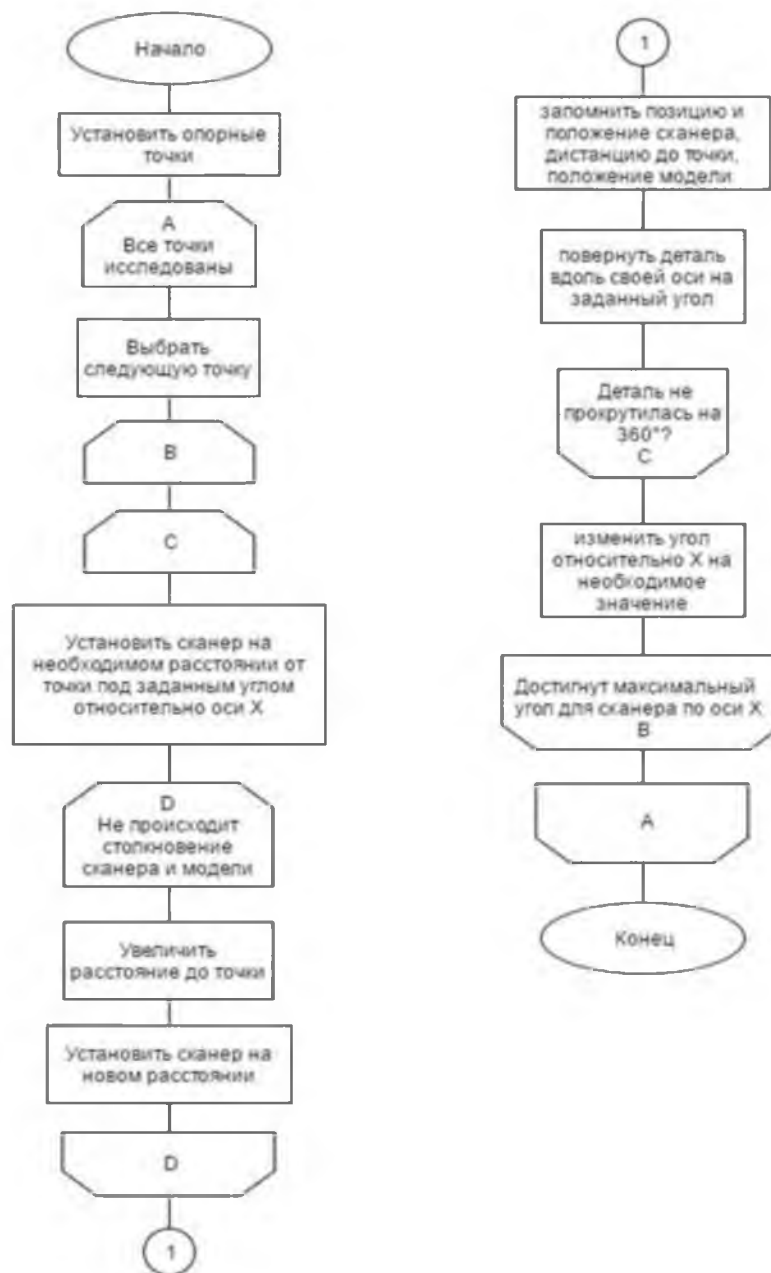


Рис. 2.10. Блок-схема алгоритма построения маршрута позиционирования манипулятора

Принцип работы алгоритма следующий (Рис. 2.11):

1. Задаются начальные параметры сканирования. В качестве параметров задаются следующие значения:

- угол вращения модели за кадр;
- значение изменения угла сканера относительно X;
- максимальный угол отклонения сканера (например, 90 (от +45 до - 45 по оси X));

- значение изменения расстояния до точки при столкновении;
- значение необходимой дистанции до точки;
- массив точек сканирования, которые были выбраны на поверхности исследуемого объекта (задаются в виде координат (x, y, z)).

2. Берем точку из массива, устанавливаем сканер на необходимом расстоянии под максимально возможным углом. Если при этом происходит столкновение, то увеличиваем расстояние до такого значения, пока не будет коллизии манипулятора с объектом.

3. Далее прокручиваем модель вдоль своей оси на 1 шаг и повторяем цикл с расстоянием от сканера до точки.

4. Когда модель прокрутилась вокруг своей оси, меняем значение угла сканера и повторяем шаги 2, 3.

5. Когда точка просканирована под всеми углами, переходим к следующей точке и повторяем шаги 2, 3, 4.

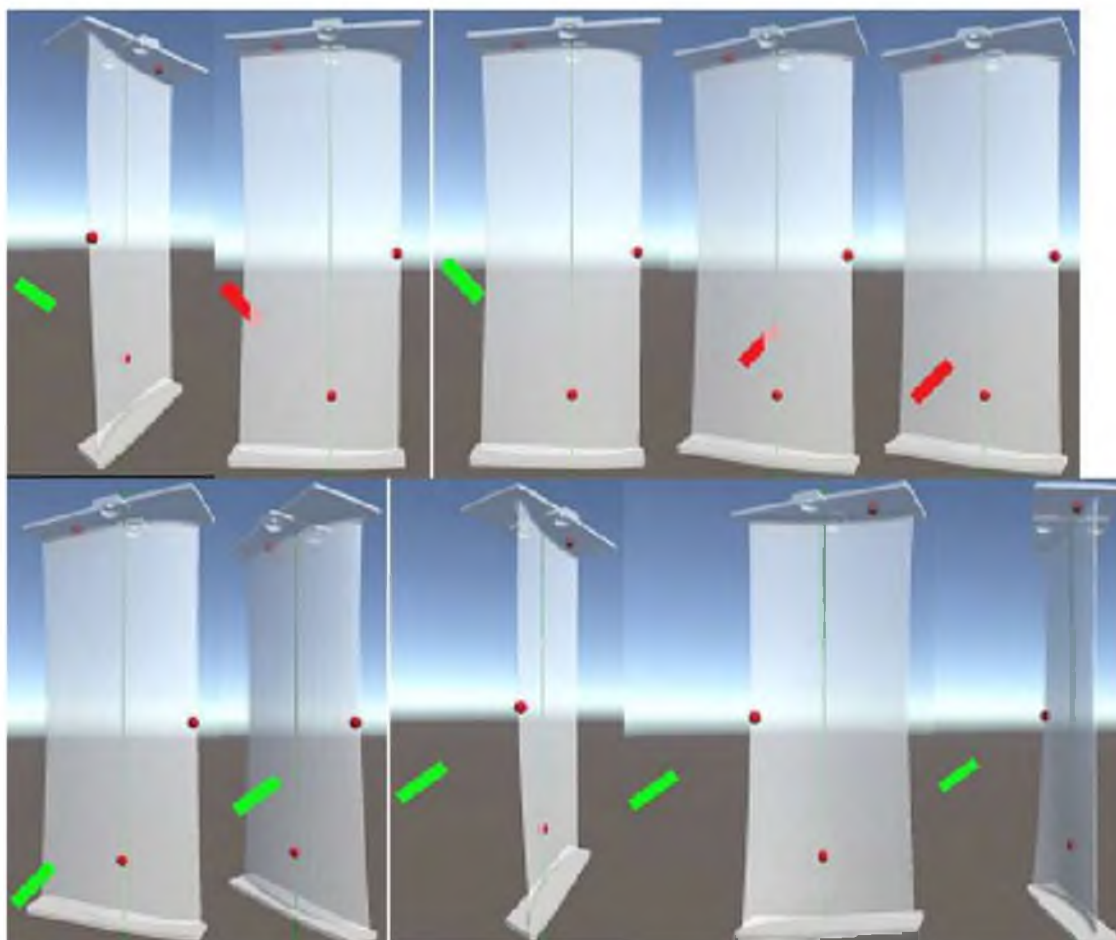


Рис. 2.11. Принцип работы алгоритма построения маршрута позиционирования манипулятора

2.4.3. Пользовательский интерфейс управляющей программы

Пользовательский графический интерфейс (далее - интерфейс) разрабатываемого программного комплекса предназначен для управления робототехнической системой, а именно – манипулятором, микрофокусным рентгеновским излучателем и поворотным столом.

Интерфейс разрабатывается с целью получения современного, удобного, эргономичного и функционального средства по управлению манипулятором съемки.

Интерфейс состоит из нескольких основных элементов управления (Рис. 2.12), описание которых приведено ниже.

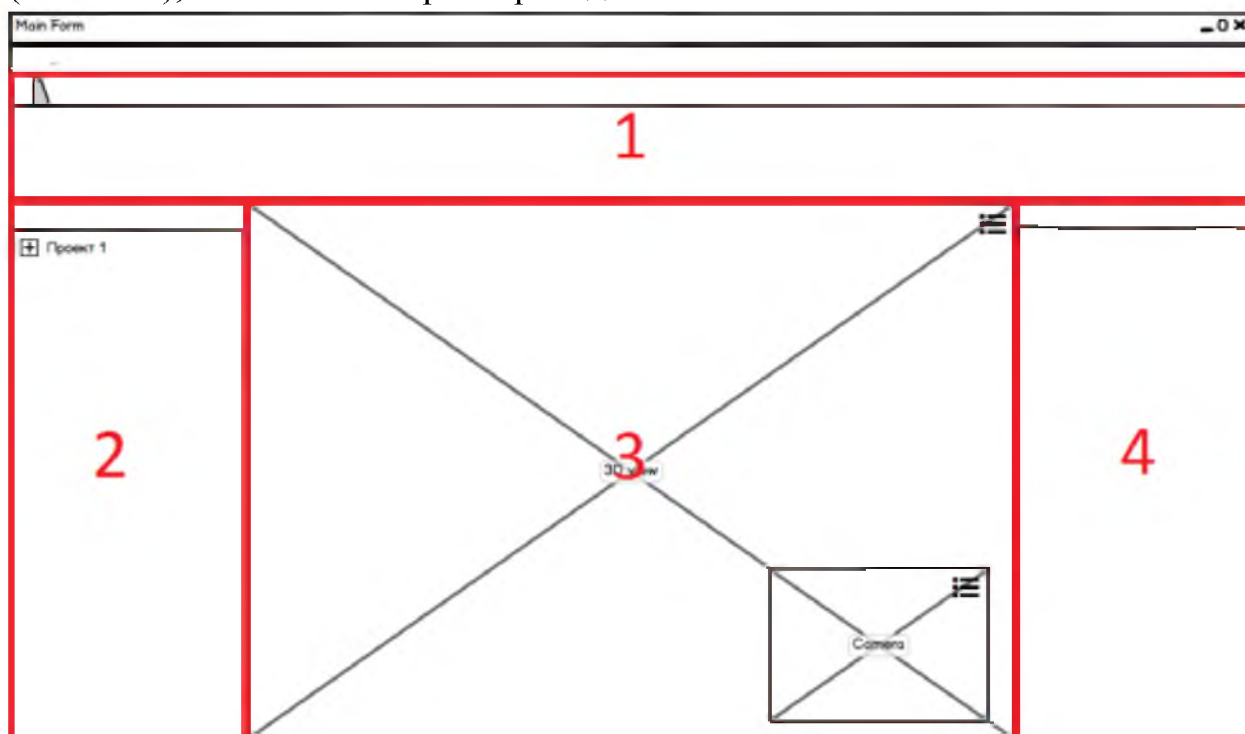


Рис. 2.12. Основные элементы управления интерфейса

1. Главная панель, определяющая один из нескольких разделов работы с комплексом;
2. Левая боковая панель, на которой отображается иерархия проекта (деталь, позиции сканирования, результаты съемок);
3. Центральное рабочее окно, на котором отображаются 3D-модели манипулятора и закрепленной на нем детали, а также – встроенное окно изображения камеры.
4. Правая боковая панель, на которой отображается контекстно-зависимая от левой боковой панели информация.

Рассмотрим подробнее элементы интерфейса, механизмы и взаимосвязи их работы.

Главная панель определяет «раздел» интерфейса – логически обособленный набор функционала, доступный пользователю, а также – набор функций и поведение центрального рабочего окна.

На текущем этапе разработки, определены следующие разделы:

Главный раздел – предназначен для основных действий. К ним относятся: загрузка обрабатываемой детали в программный комплекс, создание и просмотр последовательности управляющей программы (определение положений манипулятора и поворотного столика), запуск обработки (съемки) детали (Рис. 2.13).



Рис. 2.13. Панель главного раздела

Кнопка «Добавить деталь» - позволяет загрузить в проект 3D-модель детали для последующего моделирования съемки;

Кнопка «Удалить деталь» - позволяет удалить 3D-модель из проекта;

Кнопка «Добавить позицию» - позволяет добавить в проект новую позицию, из которой будет производиться съемка детали;

Кнопка «Удалить позицию» - позволяет удалить из проекта текущую позицию съемки.

Раздел ручного управления – предназначен для управления манипулятором съемки в ручном режиме. В ручном режиме пользователь может вручную устанавливать углы поворота каждого узла манипулятора и поворотного столика, а также перемещать манипулятор в выбранную позицию (Рис. 2.14).

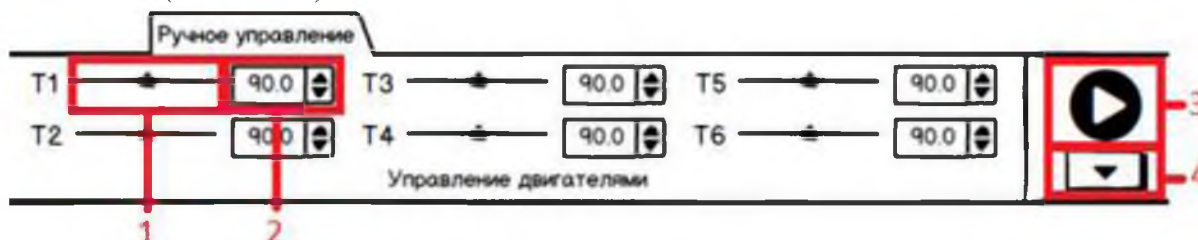


Рис. 2.14. Панель раздела "Ручное управление"

Управление манипулятором осуществляется с помощью указания углов поворота для каждого двигателя по отдельности.

Слайдеры 1 и 2 осуществляют управление двигателями. Слайдер 1 предоставляет пользователю наглядное отображение текущей позиции двигателя относительно граничных значений, в то время как слайдер 2 позволяет установить точный угол поворота двигателя, с точностью до 0.001. Набор слайдеров раздела «Управление двигателями» позволяет управлять всеми двигателями манипулятора.

Кнопка 3 посылает команду манипулятору занять определенное пользователем положение.

Кнопка 4 открывает меню управления стратегией управления манипулятором в ручном режиме (Рис. 2.15).

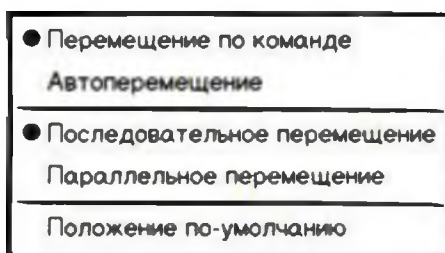


Рис. 2.15. Меню управления стратегией перемещения манипулятора

При выборе пункта «Перемещение по команде» манипулятор будет выполнять перемещение в определенное пользователем положение только по нажатию кнопки 3.

При выборе пункта «Автоперемещение» манипулятор будет выполнять перемещение в определенное пользователем положение сразу по окончании пользовательского ввода (например – сразу же после изменения значения слайдера 2).

При выборе пункта «Последовательное перемещение» манипулятор будет перемещаться в установленную позицию, последовательно изменяя положение каждого из двигателей.

При выборе пункта «Параллельное перемещение» манипулятор переместится в указанную пользователем позицию, одновременно начав работу всеми двигателями.

При выборе пункта «Положение по умолчанию» манипулятор займет заранее определенную стартовую позицию, а изменения всех слайдеров будут сброшены.

Раздел съемки – предназначен для определения точки или поверхности на детали, которую необходимо снять. При выборе точки или поверхности программная система автоматически подберет подходящие положения

манипулятора и поворотного столика для съемки этой точки или поверхности (Макет находится в разработке).

Левая боковая панель отвечает за отображение иерархии проекта и определяет функционал правой боковой панели и центрального рабочего окна в зависимости от выбранного элемента иерархии (Рис. 2.16).

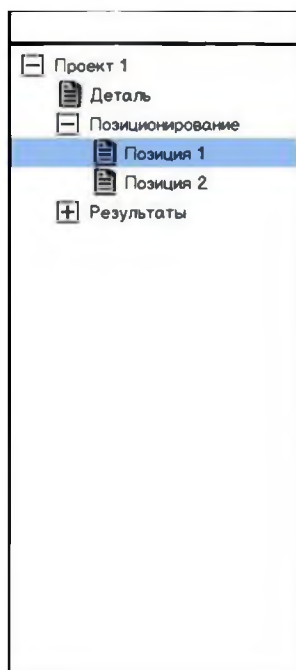


Рис. 2.16. Левая боковая панель

«Проект 1» - корневой элемент иерархии, отображает название проекта (задается пользователем).

«Деталь» - элемент иерархии, отображающий деталь, с которой ведется работа. При выборе пользователем этого элемента иерархии, правая боковая панель отобразит набор информации и свойств, зависящих от этой детали.

«Позиционирование» - элемент иерархии, группирующий позиции съемки, создаваемые пользователем, и, фактически, представляющий программу съемки детали.

«Позиция 1-N» - элементы иерархии, отображающие создаваемые пользователем позиции съемки детали. При выборе пользователем этого элемента иерархии, правая боковая панель отобразит набор информации и свойств, зависящих от этой позиции.

«Результаты» - элемент иерархии, группирующий результаты, полученные при съемке детали.

Центральное рабочее окно служит для отображения 3D-модели манипулятора и снимаемой детали. Оно является контекстно-зависимым от левой боковой панели и выбранного пользователем раздела. Отображение

этого окна будет определяться левой боковой панелью, а функционал - выбранным разделом. Так, при выборе на левой боковой панели определенной позиции, 3D-модель манипулятора будет отображать позицию, в которой будет находиться реальный манипулятор при съемке обозначенной точки, а при выборе на левой боковой панели обрабатываемой детали, фокус камеры в окне просмотра 3D-модели будет смещаться на центр этой детали, акцентируя на ней внимание пользователя. При переходе в раздел ручного управления, 3D-модель манипулятора отобразит элементы управления узлами манипулятора, а при переходе в раздел управления съемкой – позволит осуществлять выбор точек и граней съемки;

Центральное рабочее окно программы имеет несколько режимов отображения.

Режим двух окон: отображается трехмерная модель манипулятора и детали, и показания камеры. Изображения можно менять местами (Рис. 2.17).

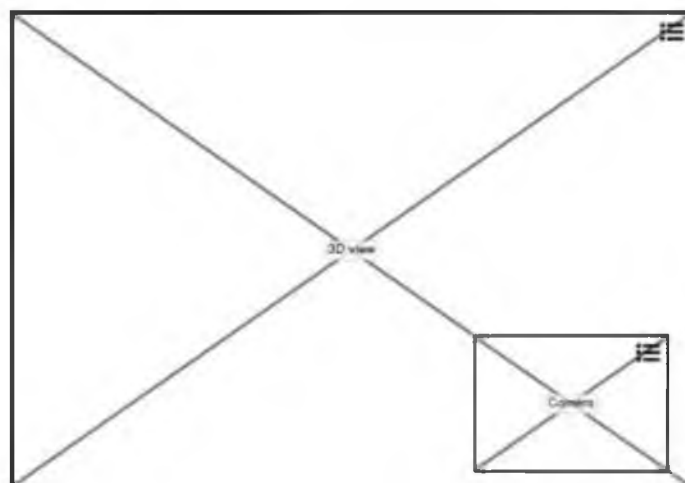


Рис. 2.17. Центральное рабочее окно в режиме двух окон

Режим четырех окон: отображается пользовательский набор окон, среди которых – двумерные проекции (сверху, спереди, сбоку), трехмерное окно и камера (Рис. 2.18).

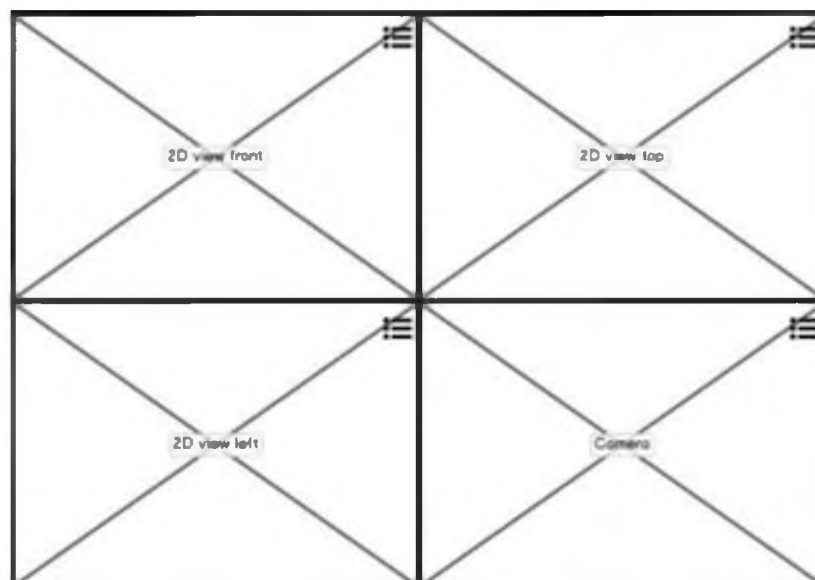


Рис.2.18. Центральное рабочее окно в режиме четырех окон

Правая боковая панель служит для просмотра и изменения информации и свойств элементов, выбранных пользователем с помощью левой боковой панели. Так, при выборе элемента «Позиция» на левой боковой панели, пользователь увидит информацию, связанную с выбранной позицией (Рис. 2.19).

Позиционирование

Снимаемая точка

X 45

Y 45

Z 25

Головка манипулятора

X 3

Y 55

Z 15

Углы наклона

Тангаж 3

Крен 55

Рыскание 15

Съемка при переходе

Количество кадров 10

Рис. 2.19. Правая боковая панель, "Позиционирование"

Снимаемая точка – определяет точку на детали в трехмерном пространстве, которую необходимо снять.

Головка манипулятора – определяет точку в трехмерном пространстве, в которой должна находиться головка манипулятора при съемке детали.

Углы наклона – определяют углы, под которыми направлен вектор из положения головки манипулятора в снимаемую точку.

Съемка при переходе – опция определяет, необходима ли съемка детали при переходе из выбранной пользователем позиции в следующую позицию, и если необходима – то сколько кадров нужно сделать при переходе.

Поскольку вектор съемки детали можно определить двумя способами (2 точки в пространстве, или начальная точка и углы наклона), то пользователь может выбрать наиболее подходящий для него способ, используя пиктограммы замков рядом с соответствующими разделами координат.

Далее представлены полноразмерные макеты интерфейса, для разделов «Главный» и «Ручное управление» (Рис. 2.20, Рис. 2.21).

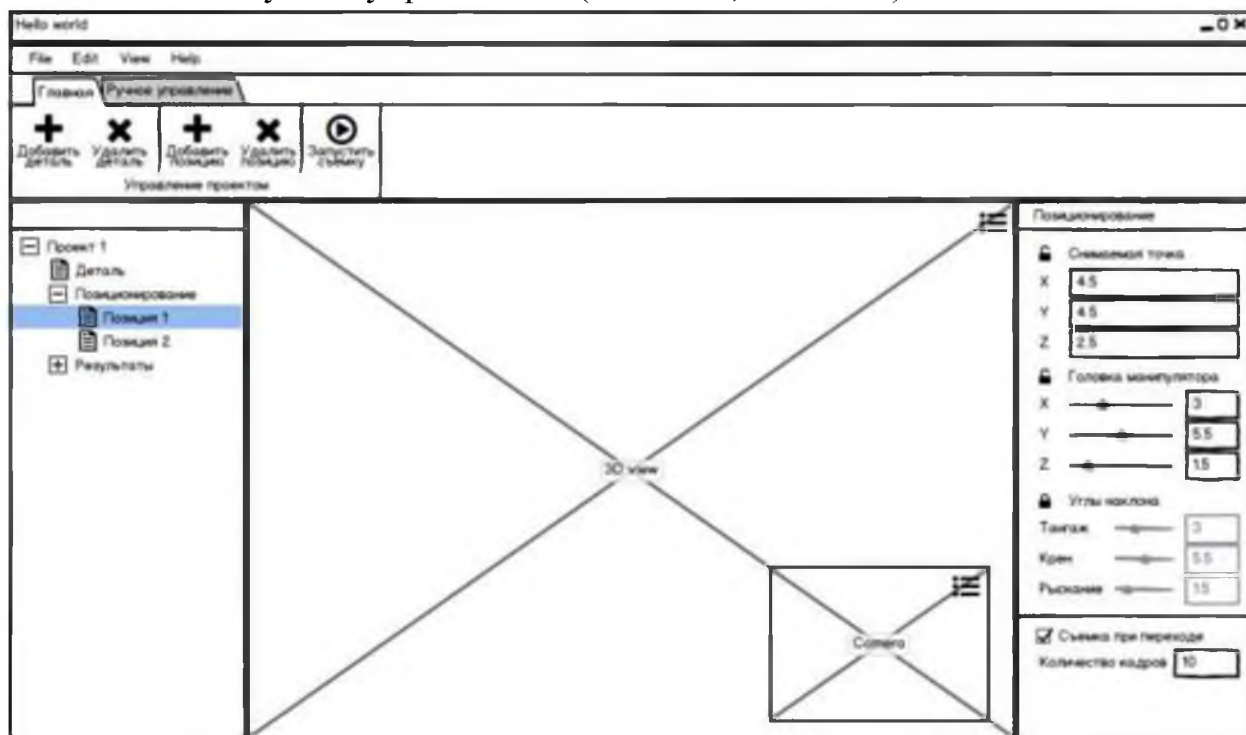


Рис.2.20. Макет интерфейса главного раздела

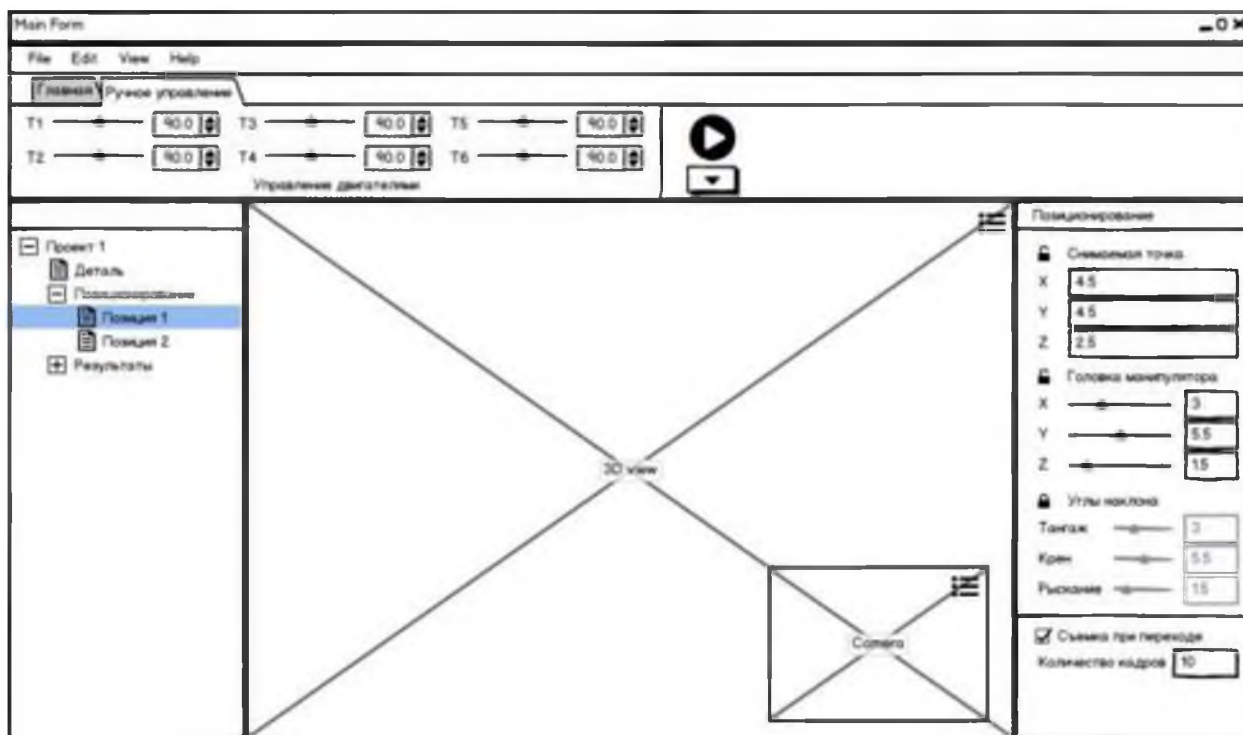


Рис. 2.21. Макет интерфейса раздела "Ручное управление"

2.4.4. Персональное обеспечение нижнего уровня

В качестве управляющих микроконтроллеров была выбрана продукция фирмы Atmel. Реализация персонального обеспечения (ПО) нижнего уровня основывается на использовании среды разработки Atmel Studio и стандартных библиотек, поставляющихся в комплекте с данной средой. Язык разработки – C. В качестве средства для занесения исполняемых кодов программы в память микроконтроллера был выбран программатор Avrdude. Выбранные средства являются бесплатными.

При разработке ПО нижнего уровня не используется объектно-ориентированное программирование, поэтому на данный момент компонентная модель представляет собой список основных (базовых) функций и обработчиков прерываний от аппаратных компонентов.

Основные источники прерываний главного контроллера, которые необходимо обрабатывать:

- USART (универсальный синхронно-асинхронный приемник и передатчик): взаимодействие со внешними устройствами через специально разработанный протокол передачи данных;

- 8-битный таймер: расчет временных задержек, определяющих работу программы и функционирование некоторых устройств (шаговых двигателей и т.д.);

- 16-битный таймер: аналогично 8-битному таймеру;

- АЦП (аналого-цифровой преобразователь): ввод значений аналоговых сигналов в микроконтроллер, подключение датчиков и т.д.;

- SPI (последовательный периферийный интерфейс): взаимодействие с различными компонентами распределенной системы, подключение датчиков и т.д.

Базовые функции ПО главного контроллера:

- Функции обработки принятых пакетов: проверка целостности принятых пакетов, выделение в пакетах команд и их параметров, анализ служебной информации в пакетах, формирование ответов.

- Функции управления узлами манипулятора: исполнение полученных от хоста команд, взаимодействие с драйверами шаговых двигателей и т.д.

- Функции контроля показаний датчиков: сбор и анализ данных с датчиков, установленных на элементах различных подсистем.

Реализация компонентной модели ПО других микропроцессорных узлов выполнена аналогичным образом.

2.5. Разработка масштабного прототипа системы

На базе концептуальной и компонентной модели был создан макет системы в масштабе 1:3, который включает в себя поворотный стол и манипулятор с установленными на его конце камерой, лазерным целеуказателем и дальномером.

Для макета шаговые двигатели излишне тяжелы и громоздки, поэтому вместо них установлены сервоприводы, используемые в моделировании: TGY-1270 и TGY-390 фирмы Turnigy. На двигатель, вращающий первое плечо, ложится максимальная нагрузка, поэтому для повышения точности перемещений и стабильности работы было решено использовать шаговый двигатель типа nema17 – 42HS4013A4-XG100, шаг 1,8°, ток потребления до 1,5А, и предустановленный понижающий редуктор 100:1.

В качестве макета рентгеновского детектора на манипулятор установлен лазерный целеуказатель типа «перекрестие», один оптический дальномер GP2Y0A21YK0F фирмы Sharp и Web-камера Canyon CNE-CWC2, которые также имитируют полезную нагрузку.

В качестве аппаратной базы используется контроллер Arduino Uno с подключенными к нему двумя драйверами шаговых двигателей (вращающий первое плечо и поворотный стол), AC-DC преобразователь 12В 3А (для питания всей системы), DC-DC преобразователи на 7,4В (для питания серводвигателей) и DC-DC преобразователи на 5В (для питания логики).

Несущие элементы конструкции выполнены из алюминиевого профиля, акрилового стекла и напечатаны на 3D-принтере из пластика ABS.

На рисунке 2.22 приведен трехмерный макет прототипа манипулятора.

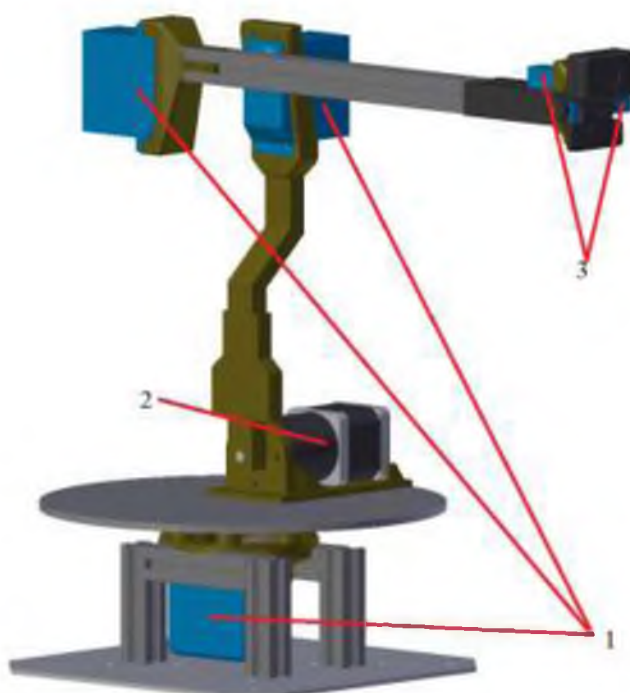


Рис. 2.22. Модель масштабного макета манипулятора: 1 – сервопривод TGY-1270; 2 – шаговый двигатель; 3 – сервопривод TGY-390.

На рисунке 2.23 приведен трехмерный макет прототипа манипулятора.

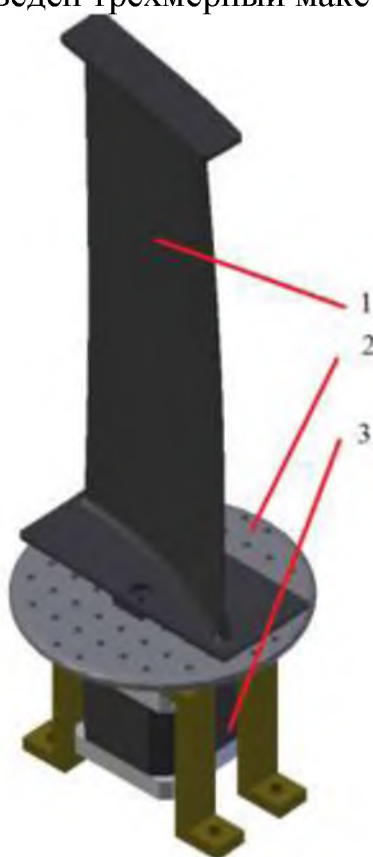


Рис. 2.23. Модель масштабного макета поворотного стола: 1 – исследуемый объект; 2 – поворотный стол; 3 – шаговый двигатель.

На рисунках 2.24 и 2.25 приведен внешний вид масштабного макета.

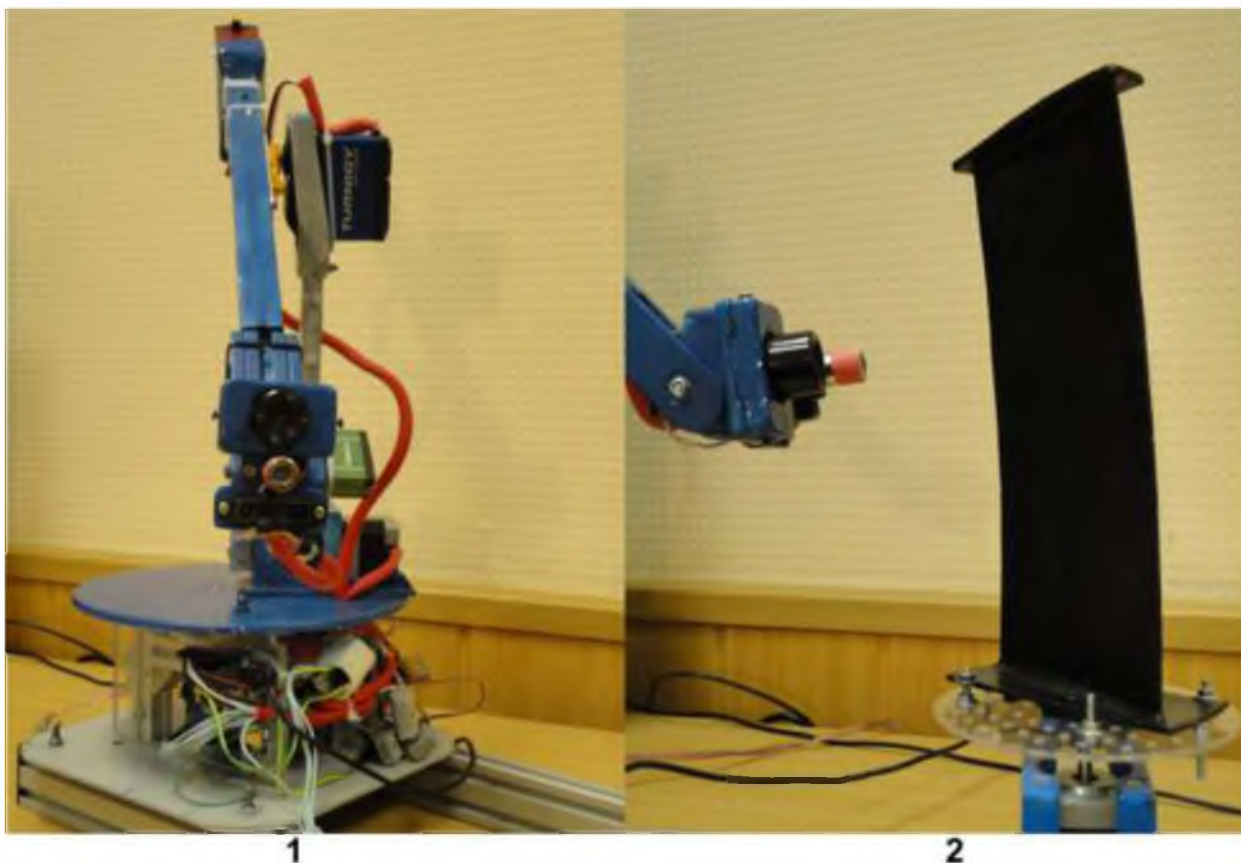


Рис. 2.24. Внешний вид масштабного макета: 1 – макета манипулятора; 2 – макет поворотного стола.

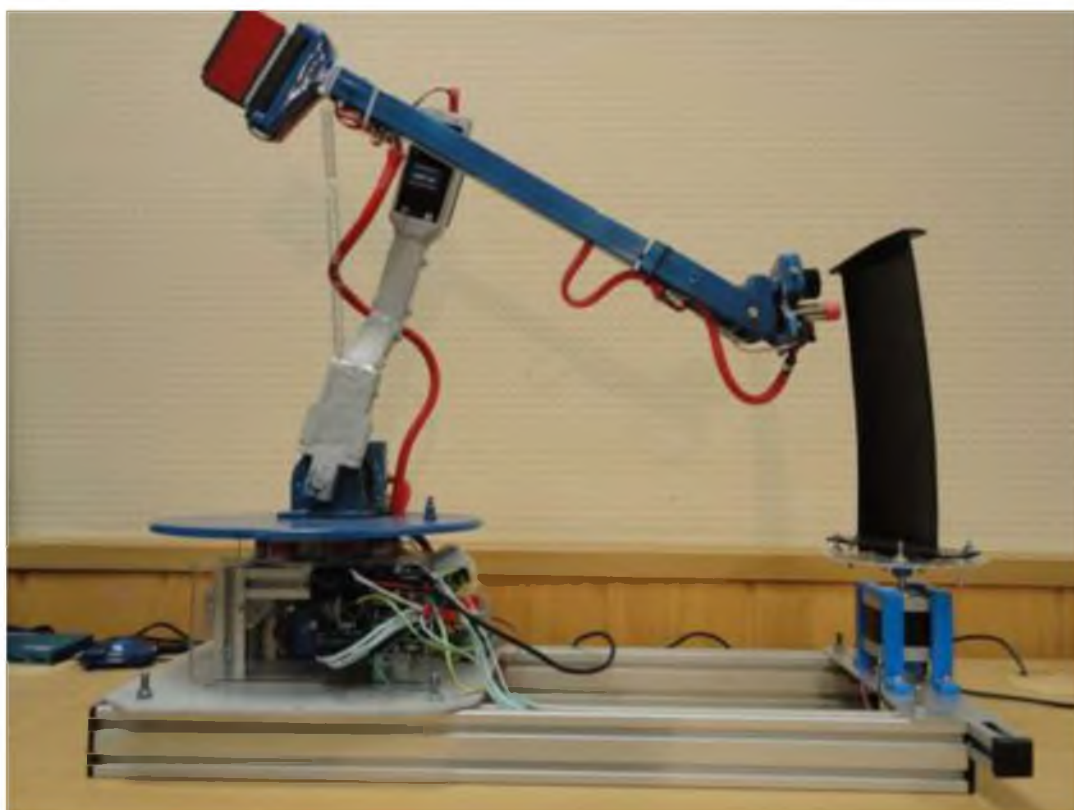


Рис. 2.25. Внешний вид масштабного макета

Представленный макет позволяет тестировать разрабатываемое программное обеспечение нижнего и верхнего уровня, алгоритмы управления манипулятором, а так же отлаживать кинематическую модель системы.

Таким образом, разработанная компонентная модель робототехнической системы с применением теплового и механического воздействия на объект позволит производить микрофокусную рентгенографию разного типа авиационных деталей и узлов из ПКМ. То есть, начиная от лопаток размерами до 300 мм, замкнутыми кольцевыми силовыми элементами монолитной конструкции и заканчивая корпусными деталями сотовой конструкции диаметром не превышающих 2100 мм.