

На правах рукописи



Е Вин Тун

**Оценка эргономичности компоновки отсека
оборудования летательного аппарата**

05.07.02– Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва– 2020

Работа выполнена на кафедре «Инженерная графика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

- Научный руководитель: **Маркин Леонид Владимирович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Инженерная графика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ)
- Официальные оппоненты: **Припадчев Алексей Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Летательные аппараты» Аэрокосмического института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет»
- Загордан Анатолий Александрович** – кандидат технических наук, главный конструктор Aircraft Maintenance and Engineering Service GmbH (AMTES GmbH).
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук.

Защита состоится 25 декабря 2020 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет):

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=118592

Автореферат разослан «___» _____ 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.10
кандидат технических наук, доцент



Денискина
Антонина Робертовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Несмотря на то, что учету «человеческого фактора» при проектировании и эксплуатации сложных технических объектов уделяется большое внимание, на практике учет эргономических факторов осуществляется традиционными способами – либо оценкой эргономичности натуральных макетов, либо использованием соматографических манекенов (плоских и пространственных) с различными степенями подвижности конечностей.

Развитие информационных технологий позволило моделировать как зоны обслуживания оператора, так и создавать виртуальные соматографические манекены, которые можно вставлять в созданные в САД-системах модели сцен. Это позволяет управлять размерами и позами компьютерного манекена, а также определять случаи взаимного пересечения манекена (как твердотельного объекта) с другими элементами сцены.

Однако даже такое использование компьютерных соматографических манекенов является низкой степенью автоматизации процесса эргономического проектирования, так как выбор положения манекена определяется опытом и интуицией проектанта, что не позволяет надеяться на рациональность выбранных конструкторских решений. К тому же остается совершенно неисследованным вопрос оценки возможности обслуживания уже размещенных объектов при выполнении с ними различных технологических операций (включая монтаж и демонтаж). Это связано с тем, что возможность доставки монтажного инструмента и обеспечения необходимой пространственной зоны для его работы не была исследована.

Цели и задачи исследования:

Целью данного исследования является разработка методического, алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего оценить эргономичность существующей компоновки. Такая оценка осуществляется поиском наиболее эффективной (с учетом заданных ограничений) трассы переноса инструмента в пространстве отсека от заданной начальной точки к конечной точке с учетом областей запретов и необходимого для работы этим инструментом пространства. Для достижения этой цели в диссертационной работе должны быть решены следующие **задачи:**

1. Разработка геометрических моделей описания формы монтажных инструментов и траекторий их перемещения в точку использования с учетом дополнительных конструктивных и технологических требований (заданных точек исходного и рабочего положения инструмента, возможность его перемещения между уже размещенными объектами, возможность обеспечения рабочего пространства для доставленного монтажного инструмента).

2. Разработка математического и программного обеспечения для реализации разработанной геометрической модели проектирования трассы перемещения монтажного инструмента и обеспечения условия его функционирования с дополнительными заданными конструктивными и технологическими ограничениями.

3. Исследование и верификация разработанного методического, алгоритмического и программного обеспечения.

4. Внедрение полученных результатов в процесс реального проектирования и учебный процесс.

Объект исследования – методы автоматизированного проектирования компоновок с учетом эргономических факторов (возможности доставки монтажного инструмента в точку использования и обеспечения необходимого для его работы монтажного пространства).

Предмет исследования – методики, геометрические модели и алгоритмы анализа взаимного положения уже размещенных (ранее скомпонованных объектов) и возможных путей прокладки перемещения монтажного инструмента и необходимого для его работы монтажного пространства с учетом дополнительных конструктивных и технологических ограничений.

Научная новизна диссертации заключается в решении следующих задач и формулировании новых научных положений:

1. Сформулирована физическая и математическая постановка задачи эргономичности компоновки как многокритериальная задача математического программирования.

2. Показана перспективность использования рецепторного (воксельного) метода геометрического моделирования для решения поставленной задачи – автоматизированной компоновки сложных технических объектов с учетом эргономического фактора (возможности обслуживания размещенной техники).

3. Показана невозможность использования имеющихся разработок в области геометрического моделирования каналовых поверхностей для решения поставленной задачи.

4. Разработан метод, основанный на использовании геометрической модели и алгоритма построения траектории перемещения монтажного инструмента в точку использования и обеспечения необходимого для него рабочего пространства.

5. Разработан универсальный метод формирования рецепторных (воксельных) моделей объектов любой геометрической сложности по их твердотельной модели, созданной в любой из CAD-систем.

6. Разработаны на принципах ситуационного управления эвристики, повышающие эффективность работы алгоритма перемещения монтажного инструмента, направленные на выбор рациональных направлений движений к месту его использования.

7. Для предложенных геометрических моделей и алгоритмов разработано реализующее их программное обеспечение на языке C#, обеспечивающего средствами интерфейса программы настройку режимов и параметров трассировки инструмента в точку использования, а также визуализацию полученных компоновочных решений в среде визуализации Unity.

8. Проведена оценка производительности реализации предложенного рецепторного алгоритма, показывающего, что процессорное время формирования рецепторной модели объекта возрастает примерно по параболической зависимости от количества рецепторов на единице длины рецепторной матрицы, но все равно составляет от десятков до тысяч секунд на компьютере средней вычислительной мощности. Также проведена верификация разработанного метода на тестовых примерах с заранее известным результатом.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке метода проверки степени эргономичности конструкции на основании предложенной геометрической модели формы монтажного инструмента и траектории его доставки в точку использования с учетом дополнительных конструктивных и технологических факторов алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего:

- Моделировать по имеющимся твердотельным моделям монтажного инструмента его форму в виде, удобном для использования в задачах оценки эргономичности имеющейся компоновки;

- Проектировать на плоскости и в пространстве в автоматическом режиме трассы траекторий перемещения монтажного инструмента в точку использования с учетом дополнительных конструктивных и технологических требований (заданных точек исходного и рабочего положения инструмента, возможность его перемещения между уже размещенными объектами, возможность обеспечения рабочего пространства для доставленного монтажного инструмента);

- Провести исследование, верификацию и тестирование разработанного алгоритмического и программного обеспечения;

- Внедрить разработанное алгоритмическое и программное обеспечение в практику проектных исследований промышленности (ООО «Гагаринский старт» и ООО «Байкал-Инжиниринг») и в учебный процесс МАИ (курсы для аспирантов);

- Наметить пути совершенствования разработанного алгоритмического и программного обеспечения в существующие CAD системы как автономного расчетного модуля.

Методология и методы исследования.

Методологическую основу работы составляют методы геометрического и математического моделирования, классические методы математического программирования, дискретного ана-

лиза и теории множеств, теории графов, теории алгоритмов. В математической постановке задача эргономичности компоновки рассматривается как задача многокритериальной дискретной оптимизации.

Методологические и теоретические основы исследования основаны на фундаментальных трудах в области:

- **общей методики автоматизации проектирования**, изложенной в трудах Вермишева Ю.Х., Горелика А.Г., Курейчика В.М., Ли К., Норенкова И.П., Семенкова О.И., а также ряда заграничных авторов - Грувера М. (Mikell P. Groover) и Зиммерса Э. (Emory W. Zimmers), Гиллоя В. (Wolfgang K. Giloi), Принса М., Шенена П. (PeterShenen), Шпура Г. (GunterSpur) и Краузе Ф. (Frank-LotharKrause), Энгельке У. (William D. Engelke), Хокса Б. (BarryHawkes), Хорафаса Д., (Dimitris N. Chorafas) и Легга С. (Stephen J. Legg) и др.

- **методики автоматизации проектирования авиационной техники**, изложенная в трудах Волошина В.В., Мальчевского В.В., Куприкова М.Ю., Лисейцева Н.К., Самойловича О.С., Осина М.И., Падалко С.Н., Пухова А.А., Формалева В.Ф. и др.

- **методов автоматизации компоновочных работ**, изложенных в работах Верхотурова М.А., Гаврилова В.Н., Гиля Н.Н., Егорова С.Я., Картака В.М., Маркина Л.В., Клягина В.А., Петрова И.А., Руднева А.С., Стояна Ю.Г., Чеканина В.А., Яковлева С.В. и других, а также зарубежных ученых Bortfeldt A., Cagan J., George J.A., Gilmore P.C., Lim A., Lodi A., Martello S., Pisinger D., Robinson D. F., Saaty T. L., Szykman S., Vigo D. и др.

- **методов эргономических исследований** в трудах Аруина А.С., Мунипова В.М., Одегова Ю.Г., Рипецкого А.В., Трофимова В.С., Феха А.И., Шарипова В.М. и др.

- **метода геометрического моделирования**, изложенные в работах отечественных ученых Валькова К.И., Денискина Ю.И., Михайленко В.Е., Осипова В.А., Похвалинского А.Б., Радзивилловича В.В., Рвачева В.Л., Роткова С.И., Салькова Н.А., Скидана И.А., Стародетко Е.А., Якунина В.И. и др., а также зарубежных Albano A., PierreBézier, PauldeCasteljau, StevenCoons, DiJkstra E.W., RobertFergusson, PearlJudea, KaneharaMasatomo и др.

- **методов дискретного моделирования геометрических объектов** в работах Зозулевича Д.М., Валеева А.Ф., Герасименко Е.П., Григорьева С.Н., Клишина В.В., Корн Г.В., Куи Мин Хана, Локтева М.А., Наджарова К.М., НьиНьиХтуна, Пащенко О.Б., Рогозы Ю.А., Силантьева Д.А., Ситу Лина, Толока А.В., а также ряда иностранных авторов –Gargantini I, Requcha A.A.G и ряда других.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод оценки эргономичности компоновки путем построения траектории перемещения монтажного инструмента в точку использования и обеспечения необходимого для его использования рабочего пространства.

2. Алгоритм, реализующий геометрическую модель построения траектории перемещения монтажного инструмента в точку использования и обеспечения необходимого для его использования рабочего пространства на базе дискретной модели пространства (рецепторной модели).

3. Архитектура и программная реализацию алгоритма оценки эргономичности компоновки, запрограммированную на языке Microsoft C# и среды визуализации Unity, обеспечивающую получение компоновочных решений и их визуализацию.

4. Результаты анализа и верификации предложенного алгоритма и его программного обеспечения (оценку точности, быстродействия и др.).

Степень достоверности и обоснованности полученных в работе результатов обеспечивается корректным применением аппарата вычислительной геометрии и компьютерной графики и подтверждается тестированием разработанных геометрических моделей и созданного на их основе программного обеспечения на языке Microsoft C# и среды визуализации Unity как при решении тестовых задач с заведомо известным результатом, так и внедрение ее результатов для оценки эргономичности компоновки в ООО «Гагаринский старт» и «Байкал Инжиниринг»,

а также Государственной регистрацией программы для ЭВМ № 2020617602 от 08.07.2020 г. Была проведена верификация методики с использованием метода имитационного моделирования, позволившего оценить вероятность нахождения существующей траектории движения инструмента в зависимости дискретности рецепторного представления модели, особенностей компоновочной ситуации, а также оценить затраты вычислительного времени в зависимости от условий тестирования.

Результаты теоретических исследований подтверждены публикациями в рецензируемых изданиях и обсуждены на научных конференциях.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных научно-технических конференциях: "Гагаринские чтения-2016", – М., МАИ, апрель 2016 года; "Авиация и космонавтика-2016", – М., МАИ. ноябрь 2016 года; "Гагаринские чтения-2017", – М., МАИ, апрель 2017 года; "Авиация и космонавтика-2017", – М., МАИ. ноябрь 2017 года; "Авиация и космонавтика-2018", – М., МАИ. ноябрь 2018 года; "Гагаринские чтения-2019", – М., МАИ, апрель 2019 года; "Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации", – Алушта, МИФИ, сентябрь 2019 г.; "Авиация и космонавтика-2019", – М., МАИ. ноябрь 2019 года.

Публикации по теме исследования. Содержание диссертационной работы отражено в 16 печатных работах, в том числе в 2-х изданиях SCOPUS, 4-х периодических изданиях, рецензируемой ВАК, в научной монографии, а также Государственной регистрацией программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 3 разделов, основных результатов и выводов, заключения и библиографического списка литературы. Общий объем диссертации составляет 160 страниц, 89 рисунков, 5 приложений Библиографический список включает в 164 наименований, в том числе 49 иностранных литературных источников.

Соответствие области исследований паспорту научной специальности 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов.

П.1. Разработка методов проектирования и конструирования, математического и программно-алгоритмического обеспечения для выбора оптимальных облика и параметров, компоновки и конструктивно-силовой схемы, агрегатов и систем ЛА с учетом особенностей технологии изготовления и отработки, механического и теплового нагружения, характеристик наземного комплекса и неопределенности реализации проектных решений.

П. 4. Исследование и анализ способов интенсификации проектирования и модернизации существующих ЛА с учетом накопленного опыта.

П. 9. Разработка методов, моделей и программного обеспечения для принятия оптимальных решений с целью исследования проектно-конструкторских задач при заданных ограничениях с учетом их компромиссного характера, риска и различимости сравниваемых вариантов изделий (процессов).

П. 15. Технологические процессы проектирования, программирования и информационного обеспечения при производстве летательных аппаратов, двигателей и их составных частей, включая технологию и средства:

- автоматизированного проектирования технологических процессов и управления ими;
- математического моделирования технологических процессов;

Личный вклад соискателя. Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором или при его непосредственном участии.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и определены задачи исследования. Сформулированы научная новизна и практическая ценность, а также положения, выносимые на защиту.

В разделе 1 проведен анализ места эргономического проектирования в жизненном цикле летательного аппарата (ЛА). Показано, что глобальной задачей оптимизации жизненного цикла изделия является сокращение «затрат на владение изделием», которые для современных ЛА значительно превышают затраты на его закупку. Весомую часть в этой доле затрат занимают затраты на обслуживание ЛА. В диссертации выявлены показанные на рисунке 1 этапы жизненного цикла ЛА, на которых целесообразно использование эргономического проектирования. Эргономическое проектирование имеет множество аспектов – антропометрический, санитарно-гигиенический, физиологический, психофизиологический, психологический, но в данном исследовании будет рассматриваться решение частной задачи эргономики – обеспечение зон обслуживания проектируемой техники. Продуманная компоновка бортового оборудования должна обеспечить нормальные условия монтажа-демонтажа и обслуживания размещенного бортового оборудования ЛА, а также создавать условия для его нормального функционирования.



Рисунок 1– Функции жизненного цикла изделия по ИСО 9004

Наиболее радикально оценка эргономичности создаваемой техники решалась натурным моделированием, при котором создавался физический макет проектируемого изделия из недорогих и легкообрабатываемых материалов. При очевидной наглядности этого метода физическое моделирование связано с большими затратами времени и материальных ресурсов на создание макета. Поэтому этапу создания натурального макета предшествовал этап эргономической оценки проектного решения.

Традиционно эргономическая оценка проекта базировалась на полученных в результате антропометрических измерений эргономических таблиц и графиков (рисунок 2а), которые позволяли оценить степень комфортности выполнения человеком тех или иных операций (рисунок 2б) и области достижимости (рисунок 2 в).

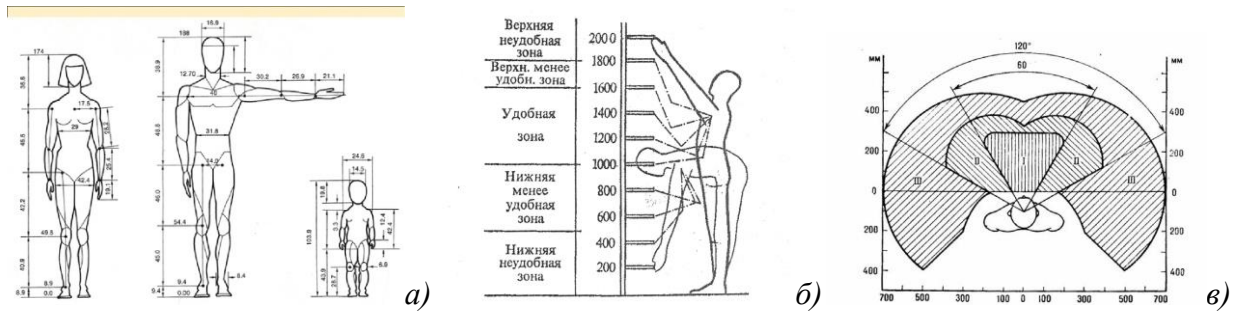


Рисунок 2 - Оценка удобства позы на основании эргономических данных

В традиционном эргономическом проектировании антропометрические данные являются основой соматографического метода, позволяющего определить взаимосвязи между пропорциями человеческой фигуры, формой и размерами рабочего места. Метод соматографии с успехом используется на этапе проектирования при решении эргономических проблем на стадии конструирования.

Для ускорения процесса оценки эргономичности компоновки на основании эргономических таблиц создаются как плоские манекены (рисунок 3а), так и пространственные (рисунок 3б). Наличие шарниров в таких физических манекенах позволяет моделировать различные позы манекена как в плоскости, так и в пространстве.

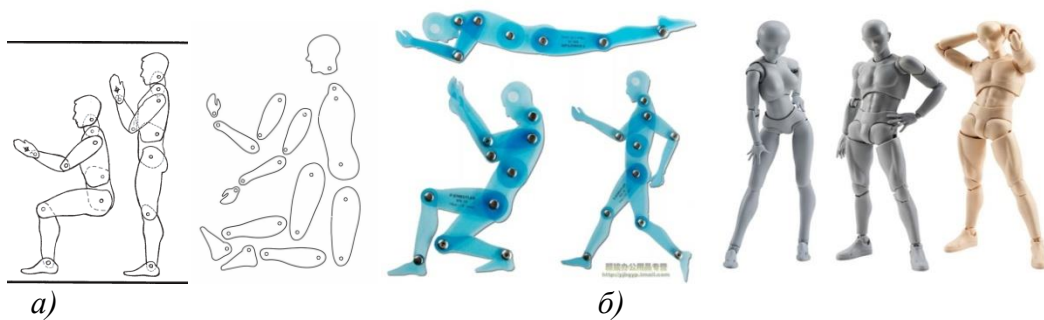


Рисунок 3 – Плоские (а) и пространственные (б) физические соматографические манекены

С развитием цифровых технологий (прежде всего систем геометрического моделирования) появилась возможность создания электронного макета изделия с твердотельным моделированием всех размещенных в нем объектов. Преимуществом такого подхода является не только возможность визуализации всех конструктивных решений (вплоть до выпуска чертежей), но и возможность извлечения большого количества дополнительной информации (например, выявление случаев взаимного пересечения всех компонентов смоделированной сцены). Такими возможностями обладают практически все современные системы геометрического моделирования (СГМ) (КОМПАС, SolidWorks, AutoCAD и др.). Это дало мощный толчок созданию электронных соматографических манекенов различной сложности (рисунок 4а). Большим преимуществом использования таких манекенов является то, что системами геометрического моделирования эти манекены воспринимаются как твердотельные модели, что, в свою очередь, дает возможность определения случаев пересечения этого манекена с другими объектами виртуальной сцены.

Такие виртуальные соматографические манекены позволяют получить практически фотореалистические иллюстрации результатов эргономического проектирования. При этом виртуальный манекен монтажника и его рабочего инструмента вставляется в сцену как твердотельный объект с параметрами, задаваемыми пользователем САД-системы (рисунок 4 б). Все параметры сцены в этом случае будут визуализацией конструкторского опыта и пространственного мышления этого пользователя, результаты которые далеко не всегда будут не только рациональны-

ми, а даже приемлемыми. Такой подход можно рассматривать лишь как продвинутое средство визуализации ранее принятых конструктивных решений.

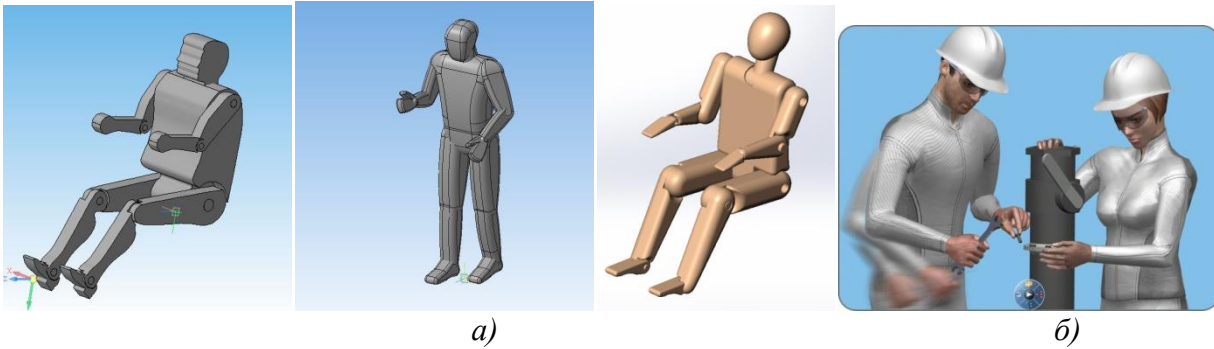


Рисунок 4 - Компьютерные сомографические манекены различной сложности

В диссертации обосновано, что с математической точки зрения оценка эргономичности компоновки может быть сформулирована как оптимизационная задача математического программирования. Принимаем в нашей диссертации следующие допущения:

1. Считаем, что в области Ω (плоской или пространственной), имеющей конкретную форму и размеры, размещено по каким-то выбранным ранее критериям множество $\{T_i\}_1^n$ объектов.

Далее будем называть эту область **компоновочным пространством**;

2. Из множества $\{T_i\}_1^n$ объектов имеется объект T_j , над которым необходимо совершить одну из строго определенного множества k технологических операций $\{W_i\}_1^k$ операцию W_j . Примеры таких операций – сверление, нарезание резьбы, фиксация объекта винтами, болтами, гайками, байонетными замками и т.п.

3. Для каждой конкретной технологической операции W_j существует набор l рабочих инструментов (множество $\{R_i\}_1^l$), каждый из которых R_j имеет конкретные размеры, рабочее положение при выполнении технологических операций, а также производительность. Это означает, что проводить затяжку гаек торцевым ключом удобнее и быстрее, чем рожковым ключом, а электрическим шуруповертом – еще быстрее и удобнее.

4. Каждый конкретный рабочий инструмент R_j имеет необходимую рабочую область - область пространства, определяемую как его геометрической формой, так и необходимыми для выполнения рабочих операций движениями. И то, и другое, требует однозначного геометрического описания. Так электрический шуруповерт по своим размерам и объему значительно больше рожкового ключа, но зато может работать в практически неподвижном положении, поэтому размеры и конфигурация рабочей зоны шуруповерта может быть значительно меньшей, чем у рожкового ключа.

5. Для каждого из рабочих инструментов R_j в системе координат компоновочного пространства $O(x,y,z)$ определены начальная точка входа $P_o(x_o,y_o,z_o)$, конечная рабочая точка входа $P_k(x_k,y_k,z_k)$, а так же ориентация рабочего инструмента относительно обслуживаемого объекта T_j . Будем определять эту ориентацию в системе координат компоновочного пространства $O(x,y,z)$ углами Эйлера α, β, γ .

С учетом этих допущений определим главный критерий эргономичности компоновки (сначала вербально, т.е. словами) – компоновочная ситуация должна обеспечивать возможность переноса выбранного рабочего инструмента R_j среди уже размещенных объектов в зону его использования и, затем, возможность осуществления в этой зоне необходимых рабочих движений. Такое движение рабочего инструмента R_j в точку его использования является траекторией

его перемещений, которая, в каждой конкретной компоновочной ситуации, либо возможна, либо нет (рисунок 5).

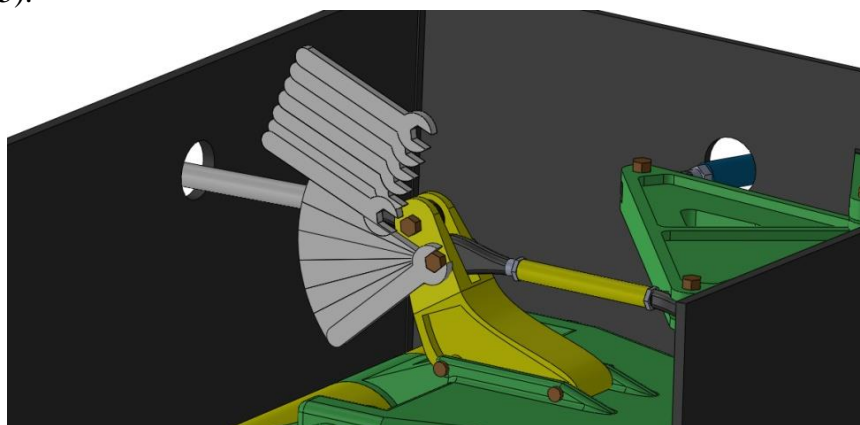


Рисунок 5 – Траектория доставки и использования рабочего инструмента

Поэтому граничным условием математического описания решаемой задачи является условие взаимного непересечения (УВН) компонуемых объектов, которое записывается в виде

$$\forall \left[R_j \in \{R\}_1^l \cap T_j \in \{T\}_1^n \right] = \emptyset,$$

т.е. для всех используемых инструментов из множества пригодных для осуществления именно данной операции, пересечение между их траекториями (подхода и выполнения технологических операций), и любого из всех ранее скомпонованных объектов образует пустое множество.

В нашем исследовании под **траекторией перемещения инструмента** мы понимаем не принятую в классической геометрии 2-х или 3-х мерную кривую, а совокупность мгновенных положений рабочего инструмента R_j при его перемещении из начальной точки $P_o(x_o, y_o, z_o)$ в конечную $P_k(x_k, y_k, z_k)$. Поэтому в нашем случае траектория – это не кривая, а твердотельная модель чрезвычайно сложной геометрической формы, что, однако, не исключает присутствия в ее составе пространственной кривой, задающей координаты и направление перемещения базовой точки рабочего инструмента R_j . При этом правильнее говорить не о единичной траектории перемещения Φ_j , которая вряд ли будет единственно возможной, а о совокупности m возможных в данной компоновочной ситуации траекторий $\{\Phi_i\}_1^m$

Очевидно, что это граничное условие вступает в противоречие с главным критерием компоновки - коэффициентом заполнения пространства K_V , представляющего собой отношение

$$K_V = \frac{\sum_{i=1}^n V_{к.о.}}{V_{омс.}}$$

где $\sum_{i=1}^n V_{к.о.}$ - сумма объемов n скомпонованных объектов,

$V_{омс.}$ - объем отсека, в котором производится компоновка.

Неосуществимое стремление конструктора привести K_V к 1, т.е. заполнить компонуемыми объектами все доступное пространство, приведет к невозможности их обслуживания. Поэтому системное рассмотрение всех факторов компоновки может привести к объективной необходимости некоторого снижения K_V .

Если обслуживание размещенных объектов осуществимо, то дополнительным критерием качества компоновки может стать оптимизационное выражение целевой функции Y

$$Y = Extr t (R_j, \Omega) \rightarrow \min \text{ при } R_j \in \{R_i\}_1^l$$

т.е. пожелание, чтобы t - суммарное время монтажа (либо обслуживания размещенных элементов) за определенный нормативный период времени для конкретного к выполнению данной операции рабочего инструмента R_j из множества допустимых для выполнения данной операции инструментов $\{R_i\}_1^l$ было минимальным при выполнении ограничения на принципиальную возможность перемещения монтажного инструмента их исходного положения в точку использования.

В диссертации показано, что на этапе рабочего проектирования ЛА оптимизация эргономичности представляет собой некоторый компромисс между плотностью компоновки приборного оборудования и легкостью его обслуживания. По существу это область Парето - оптимальных решений, иллюстрация которой приведена на рисунке 6. Выбор эргономически рациональной плотности компоновки оборудования невозможен без привязки к функциональному назначению проектируемого ЛА. Подход к решению этого вопроса, например для редко летающего самолета – разведчика и для массового магистрального самолета, для которого каждый час простоя на земле при техобслуживании является чистым убытком авиакомпании, будет существенно разным.



Рисунок 6 – Зависимость времени обслуживания от проектной плотности компоновки

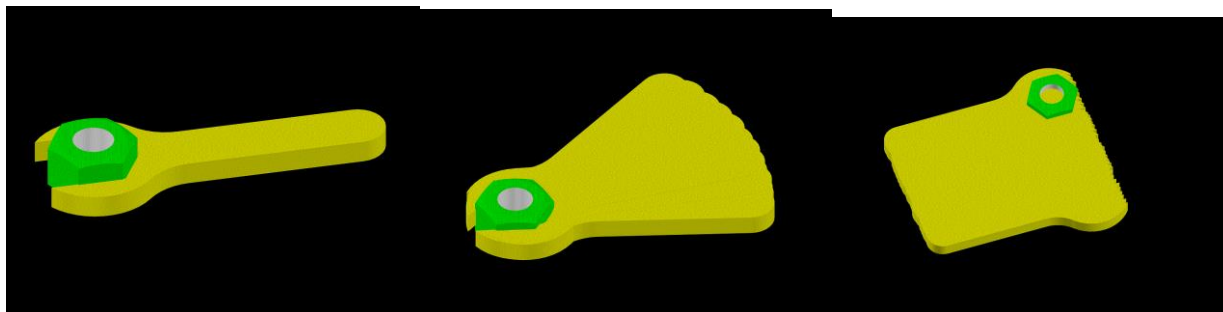
Методологическим аналогом поставленной нами задачи перемещения обслуживающего инструмента из исходной точки в точку использования являются задачи выбора направления перемещения подвижных объектов в пространстве. Такие задачи встречаются в технике при планировании движений роботов (как наземных, так и воздушных) при необходимости обхода ими препятствий. Наиболее аналитически определенным является подход, основанный на аппарате теории механизмов и машин (ТММ). Он используется для анализа движений антропоморфных роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей. Преимуществом такого подхода является возможность использования наработок в области ТММ по расчету кинематики и динамики многосвязных механизмов, а также сравнительная легкость компьютерного моделирования таких движений, недостатком – неприменимость к решению поставленной нами задачи (ввиду невозможности интерпретировать перемещение инструмента как движение механизма).

Другим техническим аналогом решаемой нами задачи является задача обучить робота анализировать окружающую среду с целью нахождения в ней препятствий или определенных объектов. Объекты могут меняться со временем как внешне, так и менять свою позицию. Поэтому возникает необходимость разработки алгоритма постоянного дообучения для распознавания новых объектов. В качестве основного источника информации для робота являются данные с телекамер и датчиков положения. Несмотря на развитие методов современной теории автоматического управления (ТАУ) и полученные на их основе результаты, исследования показали, что классические регуляторы на основе ТАУ не обеспечивают необходимого качества управления. Причиной этого является то, что расчет параметров регуляторов требует наличия точной математической модели объекта управления и возмущений, которые чрезвычайно сложно получить.

Анализ литературных источников показал, что общей современной тенденцией проектирования управления роботами является ориентация на элементы искусственного интеллекта

(ИИС) в управлении – нечеткую логику, нейронные сети, генетические алгоритмы. Однако этот генеральный путь современной науки для формирования траектории инструмента нам не подходит - практическое использование таких систем управления требует предварительного обучения на основе формируемой разработчиком тренировочной выборки. Такой подход, помимо сложности реализации, требует априорного знания оптимальной траектории перемещения инструмента в точку использования, что в нашем случае невозможно. Поэтому основным направлением данного диссертационного исследования будет разработка и исследование геометрических моделей, обеспечивающих получение информации о возможных и рациональных путях доставки определенного инструмента в определенную точку использования.

Исходя из проведенного анализа литературных источников, в этом разделе предложен основной метод решения поставленной задачи, суть которого в следующем. В моделировании используется твердотельная модель не только самого монтажного инструмента, но и необходимое пространство для его использования, а также доставки в точку использования (рисунок 7). В существующую компоновку мы будем вписывать в виде твердотельной модели как сам монтажный инструмент, так и совокупность всех его мгновенных положений в процессе доставки и использования.



а)

б)

в)

Рисунок 7 - Монтажный инструмент (а) и его траектория его перемещения как совокупность мгновенных положений при его вращении (б) и плоскопараллельном перемещении (в)

В разделе 2 обоснован выбор геометрической модели для описания траектории движения инструмента. В принятом нами подходе перемещение рабочего инструмента задается совокупностью его допустимых мгновенных перемещений, но при сложном движении инструмента в пространстве объект нашего исследования будет представлять собой сложную каналобразную форму (но при этом он будет твердотельным). Полученный таким образом твердотельный объект нам предстоит разместить среди других твердотельных объектов, выступающих областями запрета. Форму траектории движения инструмента в нашем исследовании можно сравнить с малопредсказуемой формой льдины или застывшего водопада. Возможно, в процессе компоновки нам придется деформировать эту траекторию для преодоления областей запрета, тем самым еще более усложнив ее геометрическую форму.

Необходимость моделирования столь сложных геометрических форм обусловила выбор нами метода геометрического моделирования. Учитывая изначальную «твердотельность» рецепторных моделей, для решения поставленной задачи автоматизированной эргономической компоновки нам кажется предпочтительным использование именно рецепторных моделей, дискретизирующих пространство. Пространство E^3 в, котором ведется моделирование, называется **дискретным** или **рецепторным**, а геометрическая модель, формируемая в таком пространстве, соответственно **дискретной** или **рецепторной моделью**.

В основу рецепторного метода положено приближенное представление геометрического объекта в поле или пространстве рецепторов. Трехмерные объекты описываются трехмерной матрицей $A = \{a_{i,j,k}\}$ размерностью $x \times n \times p$, каждый элемент которой рассматривается как отдельный рецептор, который может иметь два состояния – «0» или «1». Математически рецепторная

геометрическая модель описывается множеством $A = \{a_{i,j}\}$, где

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рецептор возбужден,} \\ 0, & \text{если рецептор не возбужден} \end{cases}$$

Рецептор считается невозбужденным, если через него не проходит граница объекта и он не принадлежит внутренней области. Рецепторный метод геометрического моделирования, предложенный в начале 70-х годов прошлого века белорусским ученым проф. Зозулевичем Д.М., в те годы не получил распространения из ограниченных возможностей ЭВМ по памяти и быстродействию. Англоязычным аналогом термина "рецептор", используемым в зарубежной научной литературе, является слово "Воксель" - "voxel" (аббревиатура от слов "VOlumatic" и "piXEL"), т.е. трехмерный пиксель (рисунок 8а). Хотя в настоящее время и в русскоязычной литературе все чаще используется этот термин, но мы в нашем исследовании использовали русскоязычный термин "рецептер", впервые введенный Зозулевичем Д.М. В литературе рецепторный метод имеет и другие названия («матричный», «бинарный», «перечисления элементов пространства» и т.д.).

Рецепторный (воксельный) метод имеет как свои достоинства, так и недостатки. К очевидным недостаткам следует отнести дискретность модели и потребность в больших объемах компьютерной памяти для своей реализации, невозможность исследования инженерно-дифференциальных характеристик поверхности объекта, что, впрочем, не мешает создавать из кубиков вполне узнаваемые объекты сложных технических форм (рисунок 8 б). Главным же достоинством РГМ является уникальная легкость определения условия взаимного непересечения (УВН) уже размещенных объектов – если значение конкретного рецептора «0», то он доступен для размещения, если «1» - то он уже кем-то «занят». Именно эти причины, а также увеличение вычислительной мощности современных компьютеров побудили в последние годы интерес к РГМ как во всем мире.

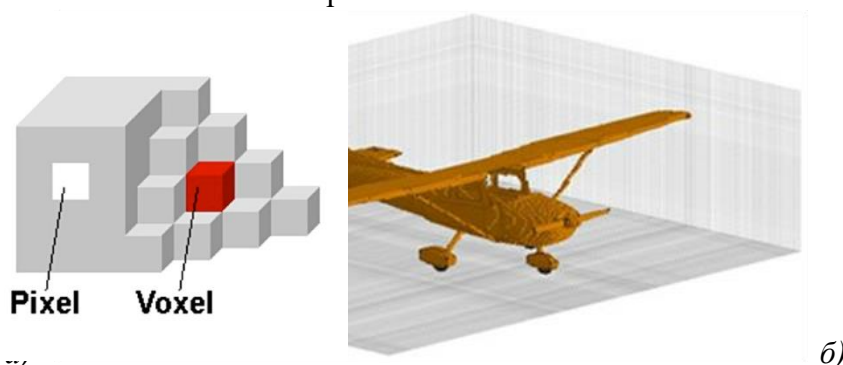


Рисунок 8 - Рецепторная (воксельная) модель легкого самолета (рисунок из Интернета)

Рецепторные геометрические модели не требуют для своей реализации сложных формул или логических построений. Однако их практическая реализация обладает своей, специфической сложностью, главной из которых является то, что они никогда не являются изначальными. Исходные объекты, с которыми работает конструктор, являются, как правило, параметрическими моделями, т.е. задающими вид объекта и его параметры, определяемые из чертежа. Рецепторную модель можно рассматривать исключительно как «внутримашинную». В данном разделе диссертации разработан универсальный метод формирования рецепторной модели по твердотельной, полученной из любой САД-системы. Этапы построения такой модели представлены на рисунке 9. При этом реализована цепочка действий «*Чертеж объекта*» → «*3D – модель объекта в САД-системе*» → «*Физическая рецепторная модель* (представление объекта методом конструктивной геометрии)» → «*Математическая рецепторная модель* (массив данных из 0 и 1)».

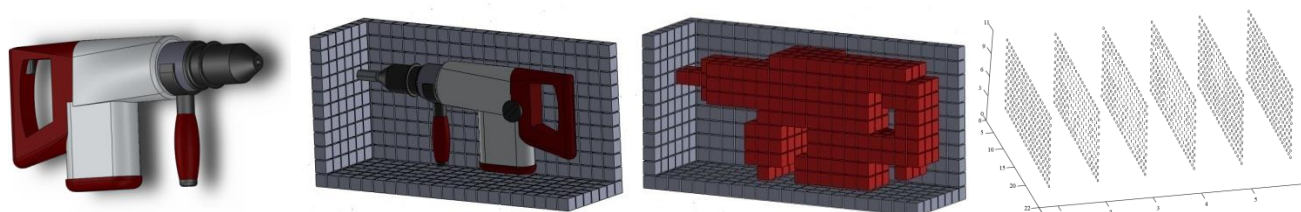


Рисунок 9 - Этапы формирования рецепторной матрицы электрической дрели

В качестве примера на рисунке 10 показаны результаты построения рецепторной модели ручной электрической дрели. По исходным данным чертежа (рисунок 10а) в SolidWorks построена твердотельная модель (рисунок 10б), которая затем была по разработанной в диссертации методике преобразована в рецепторную модель с разными размерами рецепторов: b - 1 см, z - 0,5 см, d - 0,2 см, e - 0,1 см. Очевидно, что уменьшение размера рецепторов позволяет увеличить детализацию проработки формы моделируемого объекта. На рисунке 10 ж показаны затраты процессорного времени на создание физической рецепторной модели этой электродрели при разных размерах единичного рецептора. Видно, что при уменьшении размера рецептора эти затраты ощутимо увеличиваются, но даже при самом маленьком размере рецептора в 0,1 см они составляют 900 сек, т.е. 15 минут. И это на ноутбуке с процессором i5 (т.е. со средней по нынешним временам вычислительной мощностью).

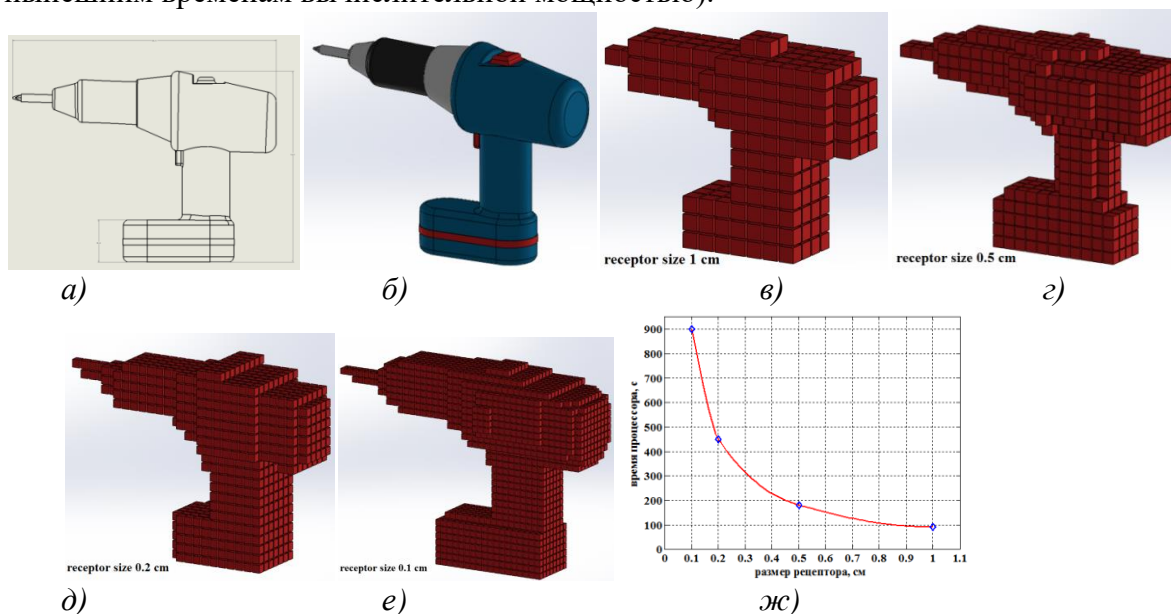


Рисунок 10 - Результаты построения рецепторной модели электродрели с разными размерами рецепторов

Построение рецепторной модели осуществляется использованием макросов CAD-системы (в нашем случае – SolidWorks). Значительное время построения РГМ мы объясняем тем, что макросы в CAD-системе работают сравнительно медленно, да и сама CAD-система в процессе этих вычислений потребляет немалые компьютерные ресурсы. Однако построение РГМ монтажного инструмента производится для каждого из них один раз, но в дальнейшем в специальной программной среде эта компьютерная матрица будет обрабатываться практически мгновенно, так как расчеты будут производиться с использованием только оперативной памяти по однородным алгоритмам.

В разделе 3 представлен метод построения траектории перемещения рабочего инструмента из некоторой точки входа в рабочее пространство в точку использования (рисунок 11), представляющей собой совокупность мгновенных перемещений рабочего инструмента по за-

данной траектории, которая затем анализируется как твердотельной объект. Если построение такой траектории возможно и твердотельная модель совокупности мгновенных положений не пересекает каких-либо уже размещенных объектов (выступающих областями запрета), то это означает возможность проведения технологических операций с использованием данного инструмента. Если же пересечение с уже размещенными объектами произошло, то у нас два варианта действий:

- изменить траекторию перемещения инструмента или же параметры ориентации инструмента в процессе перемещения на этой траектории;
- выбрать другой инструмент (например, меньшего размера) и повторить эту цепочку операций.

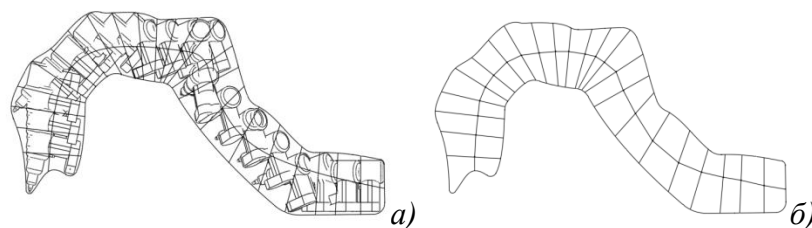


Рисунок 11 – Совокупность мгновенных положений перемещаемого инструмента (а); представление этих перемещений твердотельной моделью (б)

Несмотря на то, что описанные действия по моделированию эргономичности компоновки просты и понятны, само моделирование представляет собой достаточно сложный процесс. В нашем исследовании мы считаем, что располагаем рецепторными моделями как самих монтажных инструментов, так и необходимых для их функционирования рабочих зон. Также мы имеем рецепторную модель пространства, в котором уже проведена компоновка оборудования, часть из которого нуждается в обслуживании. Расположение уже скомпонованных объектов мы изменить не можем, от нас требуется лишь оценить, насколько удачно они расположены с точки зрения возможности его обслуживания/монтажа. Укрупненная структурная схема выполняемых для анализа эргономичности операций представлена на рисунке 12.

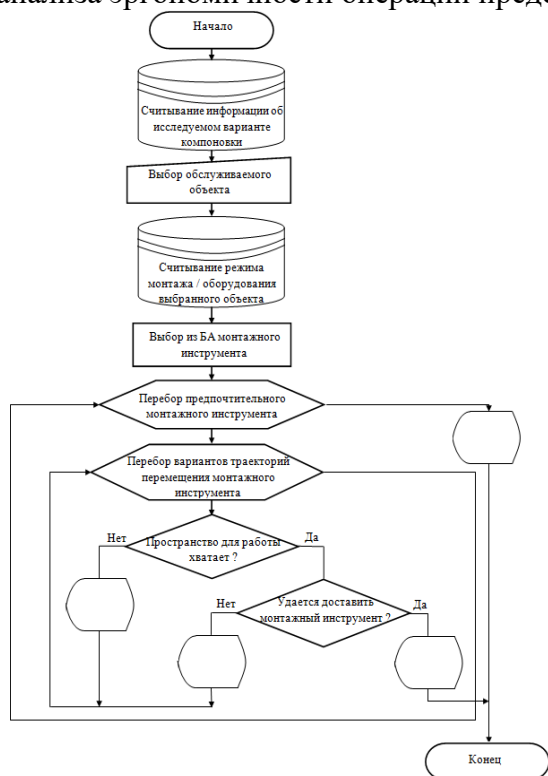


Рисунок 12 - Структурная схема алгоритма определения возможности обслуживания/монтажа размещенного оборудования

Важной особенностью нашего подхода, отличающегося от использования рецепторных моделей в их классическом виде – это использование многозначных рецепторных матриц. В нашем случае рецепторные матрицы будут не 2-значными, а 6-значными. Иллюстрация этого показана на рисунке 13, в котором, для наглядности восприятия, изображена рецепторная матрица с «крупными» рецепторами (перенесение рожкового ключа в точку использования).

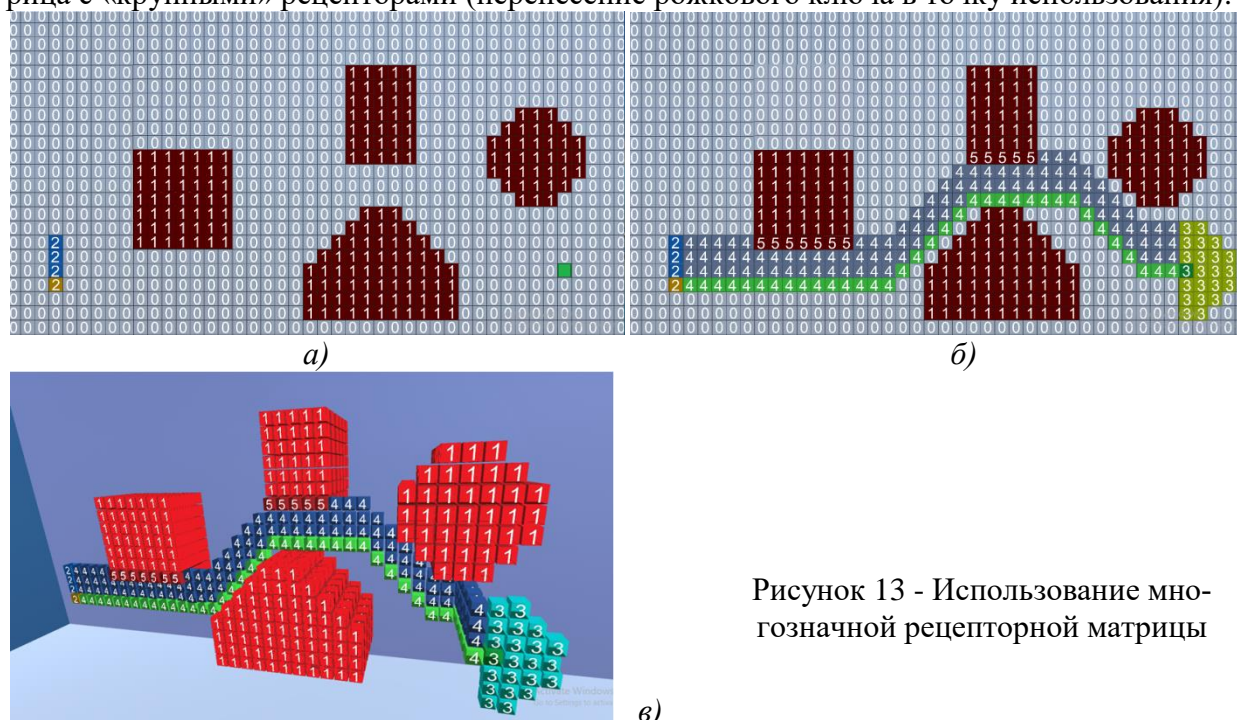


Рисунок 13 - Использование многозначной рецепторной матрицы

Применение 6-значных кодов в рецепторных матрицах, при некотором усложнении способа моделирования, позволяет получить дополнительную информацию о проблемных местах в исследуемой компоновке (невозможность проноса инструмента, невозможность выполнения монтажных операций и т.п.).

Таким образом, в нашей многозначной рецепторной модели:

Код 0 – компоновочное пространство свободное как переноса в нем монтажного инструмента, так и выполнения в нем монтажных операций;

Код 1 - уже размещенные объекты, выступающие в нашем исследовании областями запрета;

Код 2 – исходное положение рабочего инструмента;

Код 3 – рабочая зона, необходимая для выполнения монтажных операций рабочими инструментами, уже доставленными в точку их использования;

Код 4 – траектория перемещения рабочего инструмента в заданную зону использования (представляет собой чрезвычайно сложный по форме твердотельный объект);

Код 5 – части пространства уже размещенных объектов, которые не позволяют пронести рабочий инструмент в необходимую для его использования точку пространства.

Алгоритмы решения поставленной задачи реализованы в виде программ на языке С#. Также на этом языке написана графическая оболочка, визуализирующая результаты автоматизированного проектирования. Но конечно, наибольший эффект от использования описанного метода эргономического моделирования компоновки может быть получен при реализации данного модуля как подключаемого модуля к современным системам геометрического моделирования (КОМПАС, SolidWorks, AutoCAD и др.).

Самым сложным в реализации изображенного на рисунке 13 алгоритма является модуль "Перебор вариантов траекторий перемещения монтажного инструмента". Именно в этом модуле формируются допустимые траектории перемещения монтажного инструмента к месту его использования. Формирование траекторий перемещения каждого конкретного инструмента

начинается от самых простых вариантов его перемещения (по прямой от начальной к конечной точке – рисунок 14) и до все более сложных, учитывающих необходимость обхода уже размещенных объектов. Усложнение траектории инструмента производится как изменением пространственной линии перемещения базовой точки инструмента, так и изменением ориентации переносимого монтажного инструмента в пространстве.

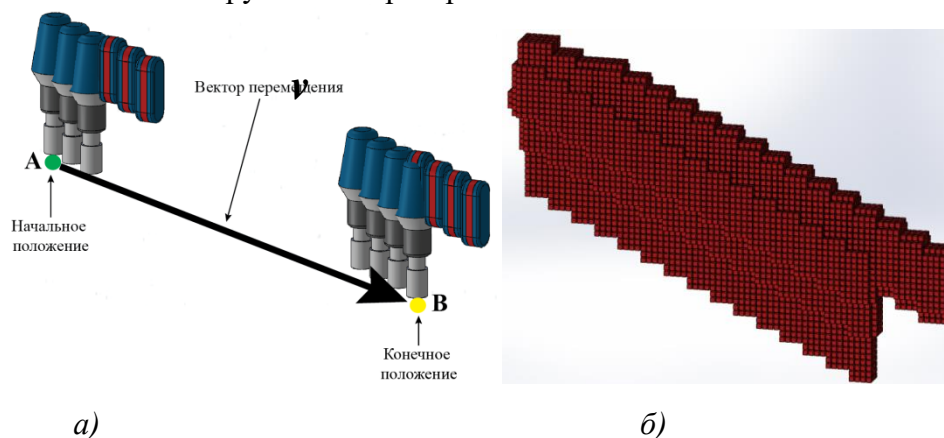


Рисунок 14 – Трехмерный сдвиг - траектория перемещения инструмента при отсутствии препятствий (а) и ее представление рецепторным пространством

Поскольку число степеней свободы свободно движущегося в пространстве твердого тела равно шести, то для однозначного определения положения инструмента в пространстве в каждый момент времени помимо линейных координат необходимо задать еще три независимых параметра ориентации. Проведенное исследование показало целесообразность использования для этой цели не классических углов Эйлера, а углов Эйлера-Крылова (самолетных углов). Для углов поворота ψ, θ, φ соответствующие матрицы этих поворотов имеют вид:

$$R_Z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_X(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}, R_Y(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

$$R = R_Z(\psi) \cdot R_X(\theta) \cdot R_Y(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & -\sin \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \sin \theta \cos \varphi \\ -\cos \theta \sin \varphi & \sin \theta & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (1)$$

Использование самолетных углов ориентации некоммутативно, поэтому принят порядок их ввода в последовательности $\psi \rightarrow \theta \rightarrow \varphi$. В нашем исследовании положение инструмента в каждой точке его перемещения по траектории будем рассчитывать как произведение

$$R_u \cdot \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{pmatrix} \quad (2)$$

где x_T, y_T, z_T – координаты центра поворота инструмента в системе координат обслуживаемого отсека;

R_u – матрица поворотов инструмента относительно системы координат обслуживаемого отсека, вычисленная по формуле (1).

Произведение, вычисленное по формуле (2), дает нам координаты каждой точки (в нашем случае – положение каждого рецептора), в подвижной системе координат после поворота инструмента в каждой точки его траектории.

К сожалению, в общем случае решение задачи проектирования трассы перемещения инструмента к месту использования не поддается многочисленным классическим методам теории автоматического управления (ТАУ), так как в нашем случае отсутствуют необходимые для этого математические модели процесса управления.

Другой класс решений связан с поиском роботом (наземным или мультикоптером) алгоритма позиционно-траекторного управления движением к цели с учетом существующих препятствий. В основе таких методов лежат алгоритмы обучения, например алгоритм обучения с подкреплением Q-learning. Известны подходы к управлению перемещением, в которых в качестве инструмента эмуляции, оценки, прогнозирования параметров и непосредственного регулирования движением объекта управления используются искусственные нейронные (ИНС). Интерес к ИНС как основе формирования алгоритмов управления движением обуславливается их способностью работать с нечеткими, неточными данными, что характерно для многих технических объектов управления.

Общим недостатком таких подходов является то, что оптимальная трасса робота нарабатывается в процессе его обучения, т.е. многократного прохождения трассы, что невозможно в нашем случае одноразового выбора траектории. Кроме того, в ИНС подходах источником обучения является информация, полученная посредством системы технического зрения (например, от локатора), позволяющая определять координаты препятствий в зоне его действия. В нашем же случае перемещаемый в точку использования инструмент, если рассматривать его как объект управления, не имеет средств локации для определения близлежащих препятствий, и не имеет «опыта», позволяющего обобщить результаты многократного прохождения траектории. Информация, которой мы точно располагаем, это:

- текущее положение инструмента в системе координат обслуживаемого объекта (включая параметры ориентации);
- чувствительность к соударению с препятствиями, обусловленная свойствами рецепторной геометрической модели;
- возможностью определения расстояний между рецепторными объектами с различными кодами (но только по направлению координатных осей и по диагональным направлениям между ними).

Если перемещаемый в отсеке инструмент рассматривать как подвижный объект, то его поведение представляет собой множество вариантов элементарных перемещений и поворотов в каждый отдельный момент времени. Такое движение однозначно описывается 6 параметрами – 3 линейными (координатами по осям x , y , z) и 3 угловыми (поворотом по углам Эйлера-Крылова). Цель управления – координация элементарных движений для достижения (в нашем случае) 2 целей:

- достижения конечной цели перемещения инструмента;
- обхода препятствий, мешающих перемещению.

В нашем исследовании построение возможной трассы перемещения монтажного инструмента формируется на основе *ситуативного подхода*. Смысл такого подхода заключается в использовании процедур ситуативно - зависимых комбинаций поведения, в которой текущая ситуация анализируется с использованием аппарата нечеткой логики на основе эвристических моделей. Выбранный нами метод формирования траектории инструмента среди препятствий является реализацией принципа *ситуационного управления*, смысл которого заключается в принятии управленческих решений по мере возникновения проблем в соответствии со складывающейся ситуацией.

Выбранная нами схема управления монтажным инструментом представлена на рисунке 15а. Объектом управления будет перемещаемый нами в точку использования рабочий инструмент. Входными данными $\{x_i\}$ являются кортеж данных о допустимом для перемещения свободном пространстве, выходными - $\{y_i\}$ – возможные направления перемещения. Выработка управляющих движением данных осуществляется в дискретных точках, в которых положение инструмента однозначно определяется 6 параметрами положения (3 линейными и 3 угловыми).

В нашем случае входными параметрами, на основании которых будет определяться возможность допустимых перемещений инструмента, будут расстояния до ближайшего препятствия. Это совокупность расстояний до ближайшего препятствия $R_i = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_n\}$ по n - направлениям возможных перемещений (на каждом шаге по направлению к цели). Поэтому в

терминах ситуационного управления наш подход к управлению перемещением инструмента является *одношаговым*. Элементарный акт управления в ситуационном подходе описывается следующим соотношением

$$S_i; Q_i \xrightarrow{U_k} Q_j.$$

Смысл этого выражения в том, что если на объекте управления сложилась ситуация Q_i и состояние системы управления S_i допускает управляющее воздействие U_k , то система переходит в новое состояние Q_j . Правила преобразования системы из состояния Q_i в Q_j называются логико-трансформационными правилами (ЛТП). Полный список ЛТП задает все наши возможности воздействия на управляемый объект и является предметом нашего исследования.

Наш инструмент для определения дистанций до препятствий не имеет приборов локации, но возможности рецепторного метода позволяют отследить расстояния до препятствий по определенным направлениям. Только по этим направлениям мы можем послать одиночный «тестовый» рецептор для того, чтобы определить, где же именно он пересечется с ближайшим препятствием. Число таких «направлений локации» ограничено либо ортогональным направлением относительно системы координат отсека, либо диагональным направлением (рисунок 15б). Такое ограничение количества направлений обусловлено особенностью программирования для задания движения «тестового рецептора» в рецепторной матрице относительно полюса инструмента, обозначенного на рисунке 15б красной точкой. Так как наша рецепторная матрица ориентирована по системе координат отсека XYZ , в которой выделен рецептор полюса инструмента, то положение перемещаемого «тестового рецептора» достаточно точно управляется тремя вычислительными циклами, каждый из которых способен «гонять» рецептор по одной из координатных осей – X , Y или Z соответственно. Изменение индекса только в одном цикле из трех перемещает «тестовый рецептор» по одной из координатных осей, по двум из трех – по одной из координатных плоскостей, а по всем трем – в пространстве. Ограничение же на «диагональность» перемещения «тестового рецептора» обусловлено лишь желанием чрезмерно не усложнять программное обеспечение, ограничивая шаг цикла для каждого случая значениями ± 1 .

Но даже с учетом этого ограничения «прямо - диагональное» движение «тестового рецептора» в пространстве возможно по 26 осям. Учитывая наше стремление двигать к цели, т.е. только вперед, отбросим все те направления, которые не ведут нас к точке использования инструмента. В этом случае количество возможных направлений движения (естественно, только прямых или диагональных) сократится до 17 (рисунок 15б). Анализ этих направлений будет заключаться в определении расстояния до встречи с препятствием при движении по каждому из этих направлений (с поправкой на габаритные размеры самого инструмента).

В этой модели мы используем главное преимущество РГМ – возможность простого определения случаев взаимного пересечения описанных таким способом объектов. Процедура посылы «тестового рецептора» по каждому из 17 направлений, представленная на рисунке 15 в, будет иметь вид:

$$\text{Move} X \begin{Bmatrix} p \\ 0 \end{Bmatrix}, Y \begin{Bmatrix} p \\ 0 \\ m \end{Bmatrix}, Z \begin{Bmatrix} p \\ 0 \\ m \end{Bmatrix} (R),$$

где R – возвращаемый параметр расстояния до пересечения с ближайшим объектом по заданному расстоянию.

Вычисленная траектория перемещения инструмента определяется набором дискретных положений инструмента «от точки к точке», т.е. кортежем линейных данных (k_1, k_2, \dots, k_n) , и кортежем угловых положений на каждом линейном шаге (a_1, a_2, \dots, a_n) , где $k_i = \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix}$ – тройка коор-

динат по каждой оси на каждом шаге, $a_i = \begin{Bmatrix} \psi_i \\ \theta_i \\ \varphi_i \end{Bmatrix}$ – тройка параметров угловых положений инструмента на каждом шаге.

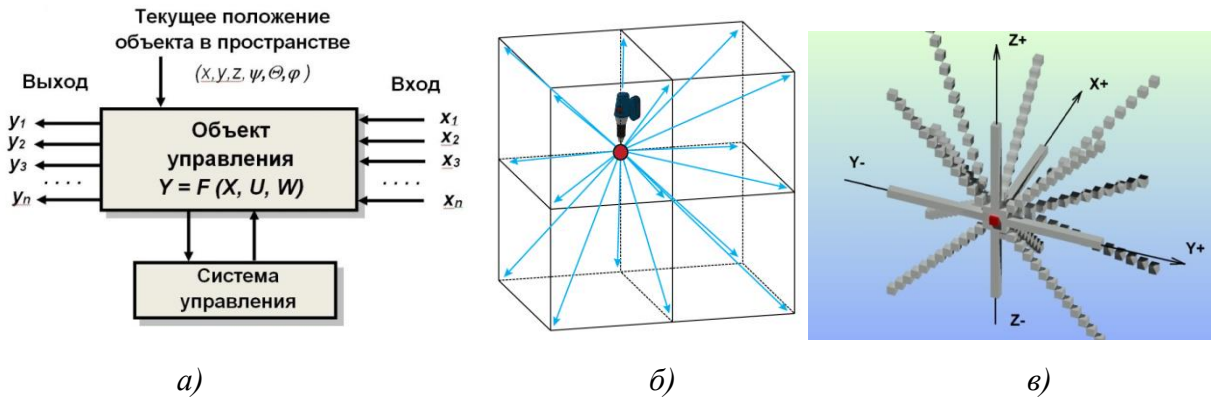


Рисунок 15 – Представление перемещения рабочего инструмента как объекта управления (а), возможные направления перемещения рабочего инструмента в пространстве (б), соответствующие им направления движения «тестового рецептора» (в)

Полученные в С# данные о сгенерированной траектории записываются во внешний файл, который может быть считан в *MicrosoftOfficeExcel*. Примерный вид углов ориентации при движении инструмента к месту использования представлен на рисунке 16.

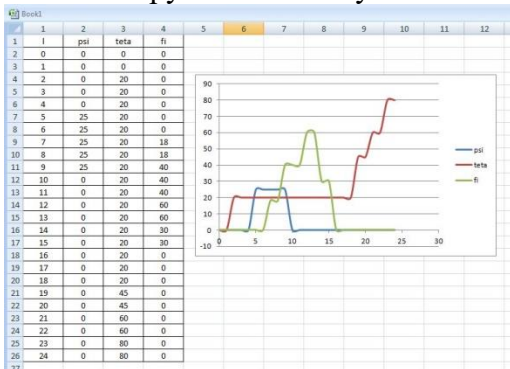


Рисунок 16 – Примерный вид диаграммы углов ориентации в базовых точках при перемещении инструмента в точку использования

Визуализация перемещения инструмента в точку использования осуществляется посредством межплатформенной средой разработки компьютерных игр *Unity*. В нашем случае *Unity* используется как движок и визуализатор геометрических объектов, имеющий сравнительно простой *Drag&Drop* интерфейс, который легко настраивать, производить отладку сцен прямо в редакторе. Главным преимуществом *Unity* в нашем случае является возможность написания скриптов на языке С#.

Следует отметить ограничения, неизбежно вытекающие из выбранной в данном исследовании геометрической модели и принятых нами ЛТП. Это:

1. Не учитываются как компоновочный объект руки монтажника, посредством которых перемещаются монтажные инструменты и осуществляются монтажные операции;
2. Для многих инструментов необходимы коммуникации (электрические или пневматические), обеспечивающие подвод энергии к этим инструментам;
3. Возможны ситуационные «ловушки», при которых алгоритм пошагового перемещения инструмента к месту использования может завести в закрытые с 3-х сторон пространства (норы).

Оправданием ограничения 1 является то, что руки монтажника, по сути, являются чрезвычайно гибким в использовании объектом, который может подхватить перемещаемый инструмент с разных сторон и в разных его местах. Ограничение 2 преодолевается все более широким

использованием монтажных инструментов с автономным электрическим питанием. Ограничение 3, обусловлено принятой нами ЛТП, в которой запрещен «задний ход». Это позволило снизить количество направлений элементарных шагов с 26 до 17 и тем самым существенно упростить алгоритм пошагового управления.

Эти упрощения обусловлены необходимостью решения в данном исследовании чрезвычайно сложной с геометрической точки зрения задачи перемещения объекта сложной геометрической формы в среде препятствий тоже очень сложной геометрической формы. Однако нет никаких принципиальных препятствий для преодоления этих ограничений усложнением алгоритма управления путем усложнения ЛТП.

Оценка эффективности метода проводилась на тестовом примере отсека, фото которого представлено на рисунке 17а, твердотельная модель вместе с монтажными инструментами – на рисунке 17б, а рецепторные – на 17в, г и затраты времени на построение РГМ отсека – на 17д.

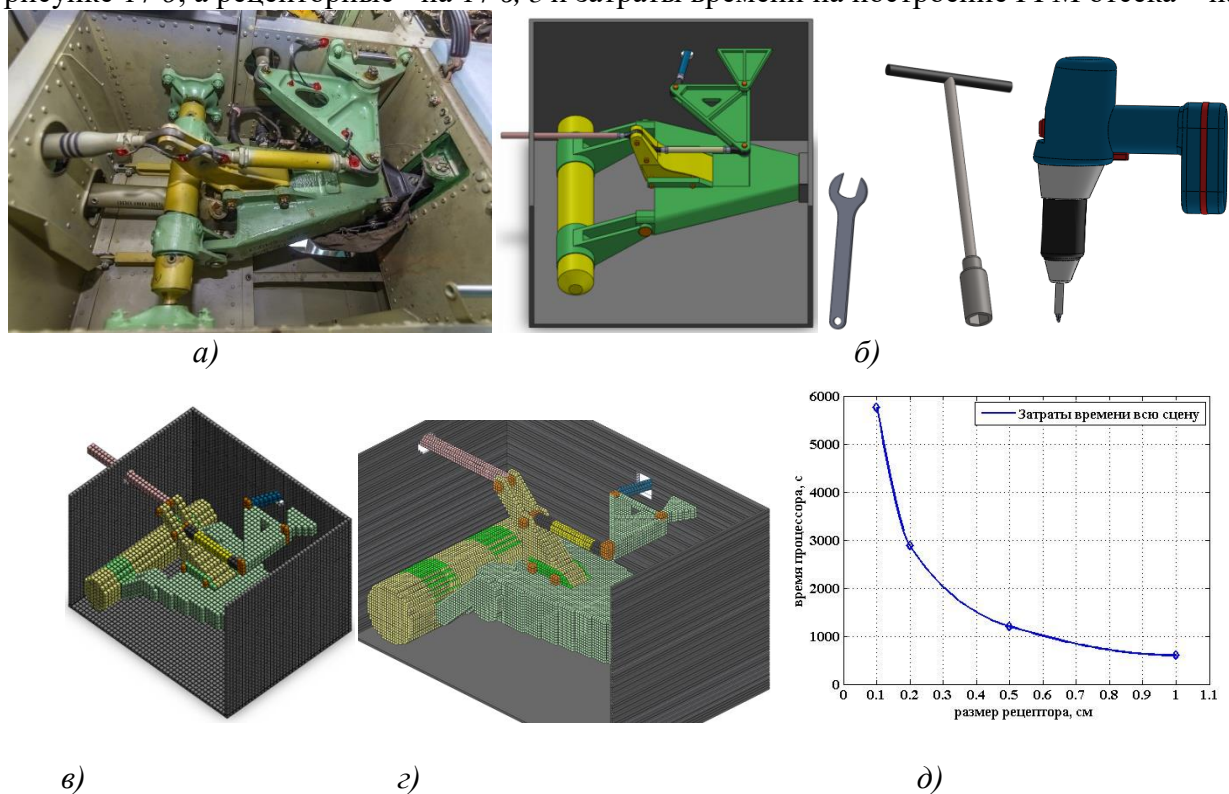


Рисунок 17 – Твердотельные и визуализированные в Unity рецепторные модели обслуживаемого пространства с различными значениями размера рецептора: в – 0,5 см., г – 0,2 см.

Визуализированные в Unity траектории перемещения различного монтажного инструмента представлены на рисунке 18)

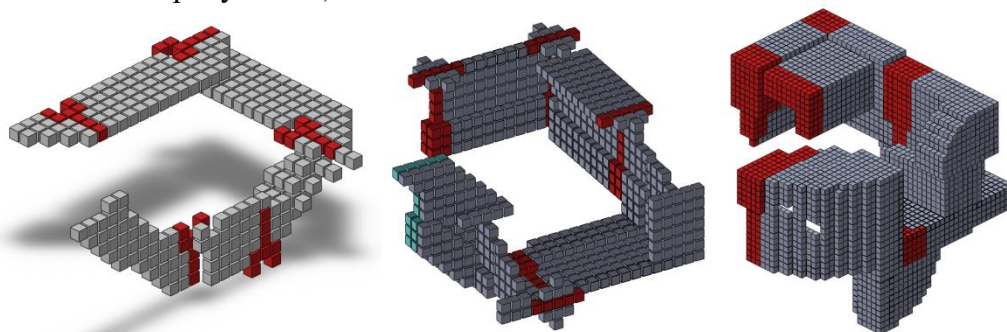


Рисунок 18 – РГМ траектории перемещения различного инструмента для обслуживания отсека

Результаты затрат времени на формирование траектории перемещения инструмента представлены на рисунке 19а, результаты верификации разработанного метода, полученные методом имитационного моделирования – на рисунке 19 б. Оно осуществлялось поиском возможной траектории монтажного инструмента в случае, когда она заведомо существует. Видно, что алгоритм не всегда видит существующую возможность проноса инструмента, если возможный зазор между ним и препятствием составляет всего несколько рецепторов. Еще больше снижается вероятность нахождения траектории, если инструмент нужно пронести через щель под углом к основным осям координат. Из рисунка 19 в видно, что наихудшие результаты тестирования соответствуют углу проноса инструмента в 45° . Очевидно, что в этом случае алгоритму необходимо больше внешней информации для того, чтобы «увидеть» наклон щели и соответствующим образом наклонить перемещаемый тестовый объект.

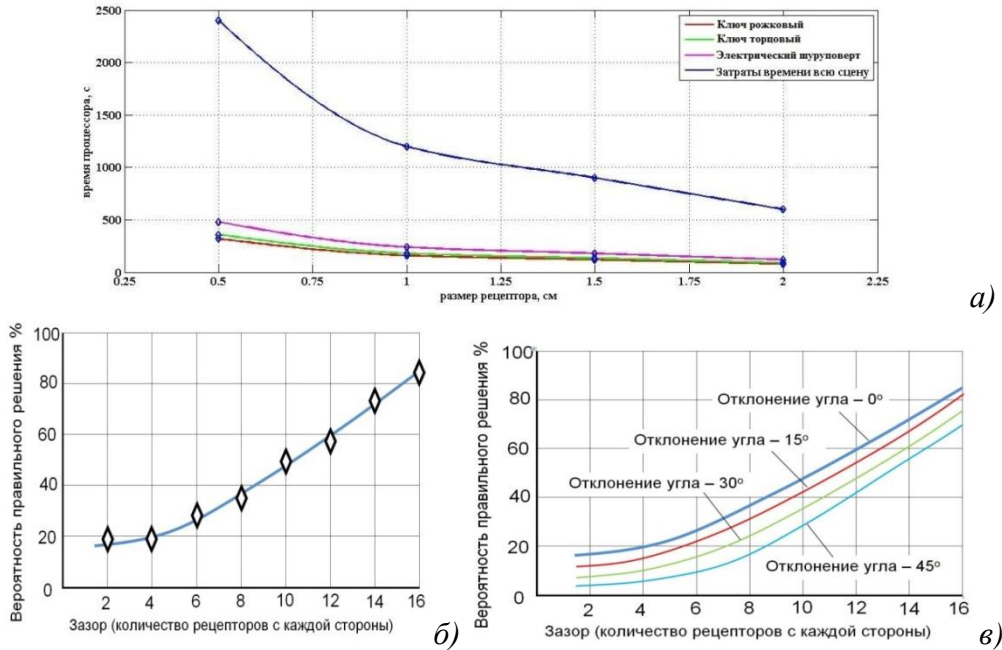


Рисунок 19 - Затраты процессорного времени на формирование рецепторной геометрической модели траектории перемещения различных инструментов в зону обслуживания и исходной сцены (а) и результаты тестового моделирования, оценки вероятности выявления существующей траектории перемещения (б, в)

Объектом внедрения диссертации являлось оценка эргономичности компоновки моторного отсека легкого самолета ТВС-2ДТС «Байкал» при попытке его ремоторизации заменой устаревшего поршневого двигателя АШ-62ИР на турбовинтовой двигатель Honeywell ТРЕ-331-12 (производство США), что существенно изменило внутреннюю компоновку моторного отсека (рисунок 20). Исследование показало невозможность выполнения некоторых монтажных операций высокопроизводительным инструментом.

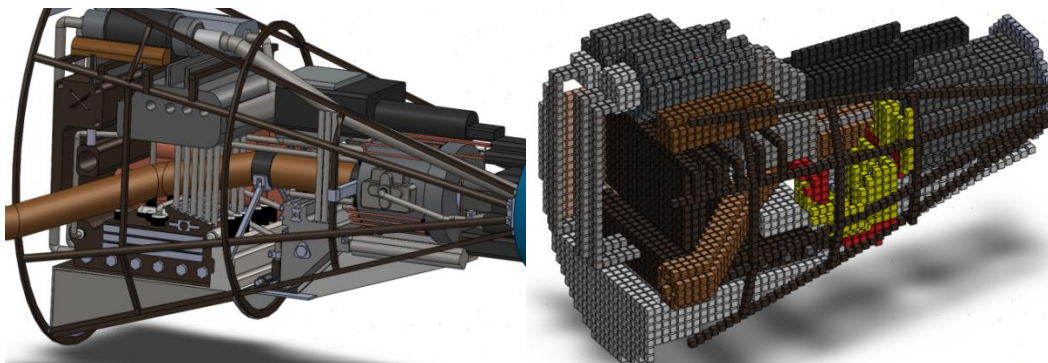


Рисунок 20 – Твердотельная и рецепторная модель моторного отсека самолета «Байкал»:

Заключение

В процессе исследования получены следующие результаты:

1. Разработан метод оценки эргономичности проектных решений при компоновке оборудования ЛА на этапе рабочего проектирования, его методическое, математическое и программное обеспечение, позволяющий оценить возможность выполнения монтажных и обслуживающих операций, необходимых для обеспечения функционирования ЛА.

2. Сформулированы математическая и геометрическая постановка задачи оценки эргономичности компоновки как задача математического программирования по минимизации времени обслуживания определенного объекта наиболее производительным монтажным инструментом.

3. Разработана методика математического описания монтажного инструмента и траектории его перемещения в точку использования рецепторными (воксельными) геометрическими моделями для последующего компонования как твердотельного объекта среди уже размещенных объектов ЛА. Траектория перемещения инструмента, формируемая методом ситуативного управления, представляет собой совокупность мгновенных положений его перемещения в точку использования, а также при совершении им рабочих операций.

4. Разработан универсальный метод получения рецепторных моделей любой геометрической сложности. Он основан на использовании предварительно подготовленных в САД-системах твердотельных моделей геометрических объектов, программирования макросов в этих системах и использования среды программирования С#.

5. Проведенная оценка затрат процессорного времени показала, что в зависимости от дискретности рецепторной модели (от 1 мм до 1 см) процессорное время формирования физической рецепторной модели инструмента составляет 1...20 минут на компьютерах средней мощности.

6. Время формирования рецепторной модели исходного отсека на компьютере средней мощности может составлять от 628 сек до 5760 сек при размерах рецептора от 1 см до 1 мм. Однако выполнение этой операции необходимо лишь 1 раз для последующего неограниченного использования рецепторной модели в практике автоматизированного проектирования.

7. Выявлены ограничения на использование разработанного методического и программного обеспечения - в процессе оценки эргономичности размещения оборудования не рассматриваются как объекты компоновки руки рабочего и коммуникации (электрические или пневматические) для привода инструментов.

8. Проведенная на тестовых примерах с заранее известным результатом верификация разработанного методического и программного обеспечения показала, что вероятность нахождения возможной траектории зависит от зазора между перемещаемым инструментом и свободным пространством для его перемещения и составляет от 18% до 83% при зазоре от 2 до 16 рецепторов.

Публикации по теме исследования. Содержание диссертационной работы отражено в 16 печатных работах, в том числе в 2-х изданиях SCOPUS, 4-х периодических изданиях, рецензируемой ВАК, в научной монографии, а также Государственной регистрацией программы для ЭВМ.

Перечень работ, рецензируемых ВАК:

1. Куи Мин Хан, Маркин Л.В., Е Вин Тун, Корн Г.В. Дискретные модели геометрического моделирования компоновки авиационной техники // Электронный журнал "Труды МАИ", 2016, № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66465>.

2. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Дискретные модели обеспечения зон обслуживания и автоматизированной компоновки летательных аппаратов // Электронный журнал "Труды МАИ", 2017, № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85901>.

3. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Обеспечение требований эргономики в автоматизированной компоновке оборудования // Геометрия и графика, Том 7, № 3, 2019. – С. 70 – 85.

4. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Построение рецепторных геометрических моделей объектов сложных технических форм // Геометрия и графика, Том 7, № 4, 2019. – С. 44 – 56.

Перечень работ, рецензируемых SCOPUS:

1. YeWinTunandL.V. Markin. Methods of formation of receptor (voxel) geometric models for automated layout tasks // 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 687 044050 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/4/044050> (SCOPUS)

2. Ye Win Tun and L.V. Markin. Usage of receptor (voxel) geometric models in the tasks of evaluating the ergonomics of engineering equipment of building structures // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 687 044050.

Научные монографии:

1. Куи Мин Хан, Маркин Л.В., Е Вин Тун, Корн Г.В. Рецепторные модели в задачах автоматизированной компоновки техники. - Саарбрюкен, изд-во Ламберт, 2016. - 110 С.

Другие публикации:

1. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Использование рецепторных геометрических моделей для обеспечения зон обслуживания проектируемой техники // Сб. тезисов конф. "Авиация и космонавтика-2016", М.: МАИ, 14-18 ноября 2016, с. 512-513.

2. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Компьютерное моделирование зон обслуживания авиационной и космической техники // Сб. тезисов конф. "Гагаринские чтения-2016", М.: МАИ, 12-15 апреля 2016, Том 3, с. 62-63.

3. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Использование рецепторных геометрических моделей для обеспечения зон обслуживания оборудования летательных аппаратов // Сб. тезисов конф. "Гагаринские чтения-2017", М.: МАИ, 5-19 апреля 2017, с. 1010-1011.

4. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Геометрические модели компоновки авиационной техники с учетом возможности монтажа и обслуживания размещенных объектов // Сб. тезисов конф. "Авиация и космонавтика-2017", М.: МАИ, 20-24 ноября 2017, с. 381-382.

5. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Универсальный способ получения дискретного описания геометрических объектов в задачах автоматизированной компоновки авиационной техники // Сб. тезисов конф. "Гагаринские чтения-2019", М.: МАИ, 16-19 апреля 2017, с. 721.

6. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Геометрическое моделирование зон обслуживания авиационной и космической техники // Сб. тезисов конф. "Авиация и космонавтика-2018", М.: МАИ, 19-23 ноября 2018, с. 417-418.

7. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Геометрические модели автоматизированной компоновки авиационной техники с учетом технологических и эргономических факторов // Сб. трудов конф. «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», г.Алушта.: МИФИ, 14-20 сентября 2019, с. 119.

8. Е Вин Тун, Маркин Л.В. Универсальный способ построения рецепторных геометрических моделей объектов сложных технических форм // Сб. тезисов конф. "Авиация и космонавтика-2019", М.: МАИ, 18-22 ноября 2019, с. 187 и 486.

Государственная регистрация программ для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617602 от 08 июля 2020 г. «Программный комплекс для автоматизированной компоновки твердотельных моделей в рецепторном (воксельном) представлении»