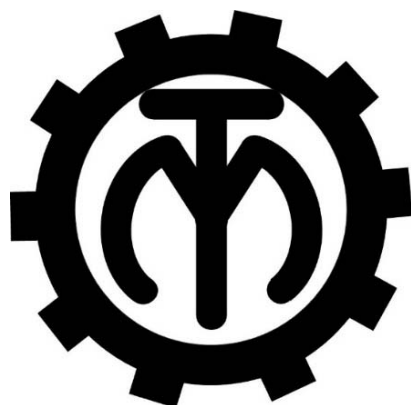


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТОВ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.9
ББК 30.605
ПЗ8

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения» «13» декабря 2022 г.,
протокол № 7

Составитель канд. техн. наук, доц. М. М. Кожевников

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. П. Прудников

Даны рекомендации к практическим занятиям, целью которых является формирование знаний о проектировании роботов и робототехнических систем, навыков конструкторских решений, а также обучение методам расчета конструкции и параметров роботизированных комплексов.

Учебно-методическое издание

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТОВ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ответственный за выпуск	В. М. Шеменков
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

1 Практическое занятие № 1. Обзор по теме курсового проектирования, исследование актуальных вопросов в области робототехники, постановка задач, обоснование принятого решения.....	4
2 Практическое занятие № 2. Расчет и оптимизация параметров роботизированного комплекса по теме курсового проекта, определение основных параметров, разработка рекомендаций и предложений.....	13
3 Практическое занятие № 3. Выполнение основных расчетов, разработка эскизов, схем, выполнение чертежей, оформление курсового проекта.....	33
Список литературы.....	46

1 Практическое занятие № 1. Обзор по теме курсового проектирования, исследование актуальных вопросов в области робототехники, постановка задач, обоснование принятого решения

Обзор по теме курсового проектирования, исследование актуальных вопросов в области робототехники. Проектирование робототехнической системы (РТС) является весьма сложной задачей из-за необходимости выбора большого количества зависящих друг от друга параметров. Поэтому проектирование РТС строится следующим образом. Всю проектируемую систему разбивают на отдельные части, которые можно затем решать последовательно или параллельно. Такая декомпозиция задачи позволяет во многих случаях свести ее к более простому линейному проектированию. Однако из-за ярко выраженной взаимосвязи различных частных задач полностью линейное проектирование РТС осуществить весьма сложно. Поэтому по мере необходимости используют итеративные методы решения, когда в процессе выполнения очередных этапов проектирования необходимо возвращаться к пересмотру ранее принятых решений. Следует также максимально использовать обзор накопленного опыта робототехники, сначала выбрать из числа известных типы решений РТС и только затем по соответствующим этим типам решений зависимостям определять числовые параметры РТС.

Основной актуальной задачей, решаемой в ходе проектирования РТС, является поиск принципиальных и основных схемных решений организации, структуры и планировки РТС, отвечающих поставленным целям. Вместе с обоснованием выбора объекта роботизации эти вопросы составляют содержание первого предконструкторского этапа проектирования и в основном соответствуют стадии разработки «Техническое предложение» (ГОСТ 2.118) и частично – «Эскизный проект» (ГОСТ 2.119).

В ходе разработки проекта РТС необходимо выполнить следующий комплекс проектно-конструкторских работ.

1 Выбрать из числа серийно выпускаемых промышленных роботов такую модель, технические параметры которой наиболее близки к требуемым. Если ни одна из существующих моделей не может непосредственно обеспечить требуемые технические характеристики, то разрабатывается проект модернизации ближайшего по своим параметрам промышленного робота. При этом чаще всего требуется модернизация или разработка новых захватных устройств, введение дополнительных точек позиционирования и степеней подвижности, в том числе для переориентации обрабатываемого изделия или его досылки в оснастку оборудования.

2 Выбрать, если возможно, из числа известного и хорошо зарекомендовавшего себя в эксплуатации необходимое сервисное оборудование: магазины, накопители, транспортирующие и передающие устройства. Зачастую и в этих устройствах бывает необходимо модернизировать или разработать

заново те элементы конструкции, которые непосредственно взаимодействуют с обрабатываемыми изделиями.

3 Модернизировать, кроме промышленного робота и сервисного оборудования, в той или иной степени основное технологическое оборудование с целью обеспечения возможности его работы в составе РТС.

4 Разработать на основании выбора конкретных типов роботов, сервисных устройств и модернизации основного технологического оборудования уточненную компоновочно-технологическую схему РТС, на которой показывается взаимное расположение всего комплекта оборудования и траектории манипулирования. На основании этой схемы проектируются фундаменты и металлоконструкции, прокладываются коммуникации.

5 Разработать полный алгоритм работы РТС. Для этого определяются все состояния системы и переходы между этими состояниями, анализируются все недопустимые и нежелательные сочетания срабатываний различных устройств РТС, возможные отклонения от требуемого процесса функционирования системы. На основании этого анализа формируются требования на проектирование системы автоматического управления всего РТС. Последовательность переходов и условия их допустимости – основа для составления программы управления РТС.

Постановка задач, обоснование принятого решения. Одной из наиболее значимых постановок задач при проектировании РТС является задача проектирования роботизированного технологического комплекса (РТК). При проектировании РТК можно выделить следующие четыре основных этапа:

- 1) подготовку исходных данных для проектирования РТК на основе анализа технологического процесса;
- 2) определение состава участков РТК, каждый из которых содержит только по одному роботу;
- 3) проектирование таких участков РТК;
- 4) проектирование РТК в целом путем объединения разработанных ранее участков.

Взаимная связь этих этапов и общая последовательность проектирования РТК может быть описана алгоритмом, схема которого изображена на рисунке 1. Рассмотрим более подробно первый этап – *А1*: «Анализ технологического процесса и формирование исходных данных для проектирования РТК». В этот этап входит следующее.

1 Описание формы и размеров детали, выполняемое либо графически (в виде эскизов), либо аналитически. В последнем случае необходимо ввести систему координат детали $x_u y_u z_u$, центр которой и направление осей целесообразно выбирать в соответствии с базами детали. Тогда для задач общего проектирования РТК форма детали может быть аппроксимирована описанным параллелепипедом, грани которого параллельны этим осям координат, а размеры – координатам этих граней $x'_u, y'_u, z'_u, x''_u, y''_u, z''_u$ (рисунок 2).

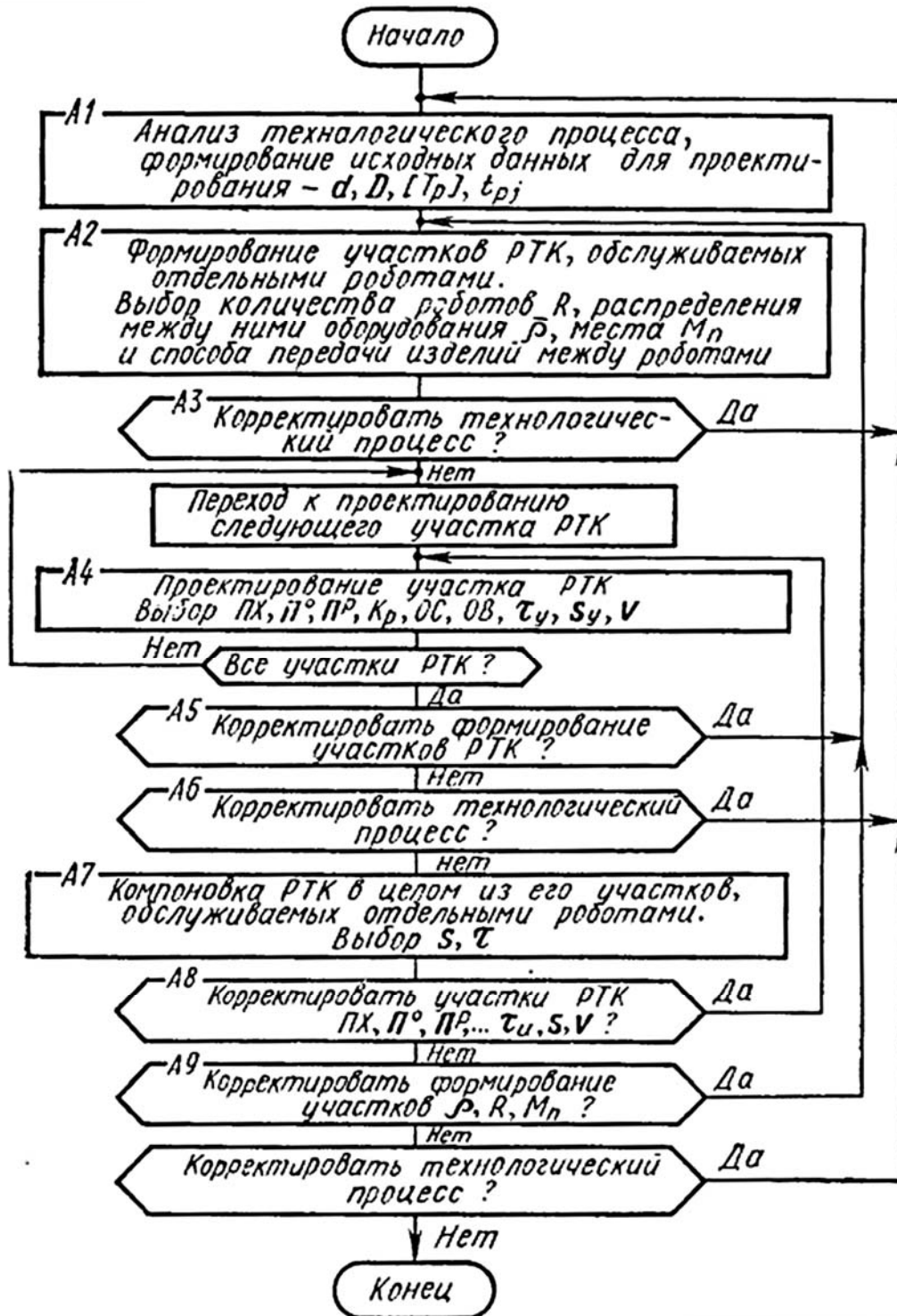


Рисунок 1 – Последовательность проектирования РТК

2 Анализ маршрутного технологического процесса изготовления детали, подбор состава основного технологического оборудования, между которым распределяются операции по обработке заготовки. Это распределение стремятся выполнить так, чтобы время $t_{рj}$ обработки заготовки на различном оборудовании было по возможности равным или кратным.

3 Выбор оснастки технологического оборудования. При этом уточняется положение детали, установленной в оборудование. Это положение может быть

описано тремя координатами $x'_{uj}, y'_{uj}, z'_{uj}$ центра системы координат детали O_u относительно системы координат x_j, y_j, z_j оборудования, а также параметрами $\alpha'_{11}, \alpha'_{12}, \alpha'_{13}, \dots, \alpha'_{33}$ задающими ориентацию осей координат детали x_u, y_u, z_u и оборудования x_j, y_j, z_j . Аналогично описывается положение детали в момент окончания съема или начала установки в оборудование: $x''_{uj}, y''_{uj}, z''_{uj}; \alpha''_{11}, \alpha''_{12}, \alpha''_{13}, \dots, \alpha''_{33}$.

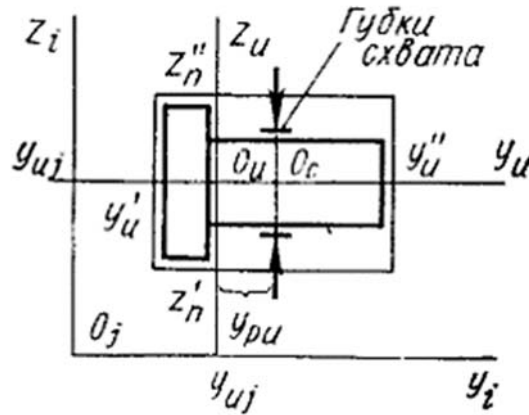


Рисунок 2 – Аппроксимация детали параллелепипедом

4 Выбор схемы и компоновки оборудования входа в РТК и выхода из него. Это оборудование представляет собой различные магазины, бункеры, откуда первый робот забирает заготовки, а последний отдает туда готовые детали. Для оборудования входа и выхода РТК описываются положения детали так же, как и для основного технологического оборудования.

5 Определение мест захвата детали роботом, которые могут быть описаны координатами $x'_{pi}, y'_{pi}, z'_{pi}$ центра зажимающих изделие губок схвата относительно системы координат детали $x''_{pi}, y''_{pi}, z''_{pi}$. Причем эти места захвата могут быть различными для загрузки и разгрузки в одно и то же оборудование.

6 Определение типа схвата робота (торцевой или боковой), а также формы и размеров его губок.

7 Определение состава локальных движений кисти робота по переориентации схвата, а также их параметров – ориентации, диапазонов движений и количества точек позиционирования.

8 Определение потребности и состава вспомогательного оборудования для перезахвата изделия. Такие вспомогательные позиции требуются в тех случаях, когда место захвата изделия роботом при разгрузке предыдущего оборудования не совпадает с местом захвата при загрузке следующего оборудования.

9 Описание формы и размеров основного и вспомогательного технологического оборудования либо графически в виде эскизов, либо аналитически. В последнем случае форму оборудования, включая его оснастку, можно аппроксимировать набором из N параллелепипедов, грани которых параллельны осям координат рассматриваемого оборудования x_j, y_j, z_j (рисунок 3).

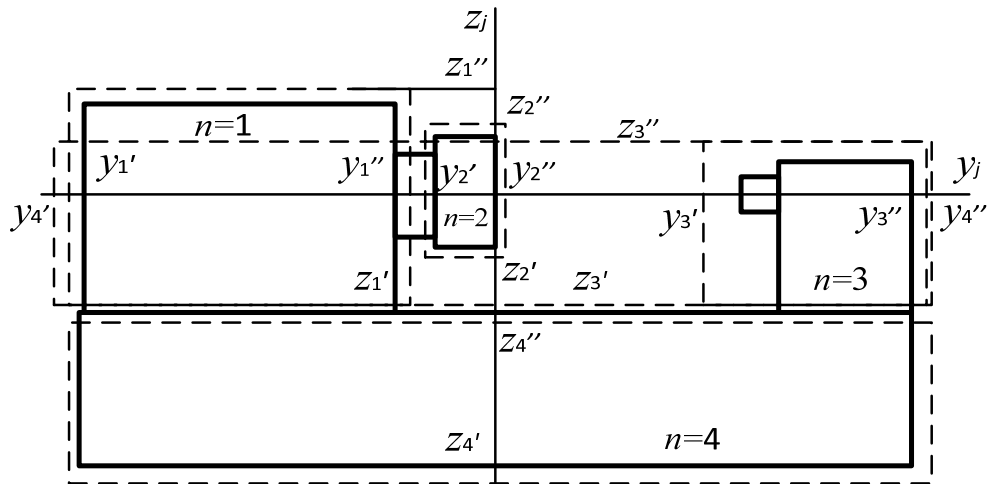


Рисунок 3 – Аппроксимация оборудования

Таким образом, в результате выполнения этапа $A1$ могут быть сформулированы все исходные данные для проектирования РТК.

Выбор станочного оборудования. Данный этап проектирования связан с разработкой маршрутного технологического процесса и является решающим в выборе моделей технологического оборудования, промышленных роботов и вспомогательных устройств, комплектующих РТК. Для этого используют данные, полученные ранее (анализ исходной информации и последовательность изготовления детали).

Выбор технологического оборудования осуществляется в зависимости от типа производства, габаритных размеров заготовки и требуемой точности обработки. Входящее в состав РТК технологическое оборудование (станки с ЧПУ, полуавтоматы) должны обеспечивать:

- полную автоматизацию цикла обработки детали;
- надежное базирование и автоматический зажим заготовки в рабочей зоне;
- свободный доступ захватного устройства ПР в рабочую зону;
- стыковку системы управления и электроавтоматики с ПР и вспомогательными устройствами для преобразования и передачи технологических команд;
- механизированное или автоматизированное удаление стружки;
- контроль наличия детали в рабочей зоне, правильности ее расположения и базирования в зажимных приспособлениях;
- автоматизацию ограждения рабочей зоны.

Целесообразность применения той или иной модели ПР определяется соответствием конструктивно-технологических параметров их функциональному назначению:

- числом степеней подвижности для выполнения требуемого объема операций (действий);
- соответствием манипуляционных возможностей схемам загрузки и зонам обслуживания основного технологического оборудования;

– минимальным количеством вспомогательных устройств и простейших средств автоматизации, необходимых для правильного течения технологического процесса;

– простотой и краткостью цикла переналадки, высоким коэффициентом использования и минимальным временем простоя основного технологического оборудования;

– обеспечением требований техники безопасности.

Выбор вспомогательных устройств осуществляется в зависимости от типа, формы, массы, материала и размеров деталей, технологических схем оборудования и серийности производства.

Для обработки деталей типа тел вращения применяются токарно-винторезные станки. При автоматизации производства необходимо использование станков с ЧПУ. При проектировании для РТК могут быть применены, например, токарно-винторезные станки с ЧПУ САК 6140, САК 6150, САК 6166, САК 6180 или другие аналогичные. Эти станки предназначены для автоматической токарной обработки по двум координатам X и Z , в том числе для нарезания метрической, конической, дюймовой, модульной и питчевой резьбы. Жесткость станины и широкий диапазон частоты вращения шпинделя и подач позволяют полностью использовать все возможности современных инструментов при обработке различных материалов и обеспечивают отличную повторяемость при серийной обработке деталей.

Выбор средств технологического оснащения. Технологическая оснастка включает приспособления, инструменты и средства контроля. Технологическое оборудование РТК оснащается быстродействующими, стандартными или унифицированными приспособлениями, обеспечивающими точность установки заготовок и быструю переналадку. При определении режущего инструмента учитывается метод обработки, материал обрабатываемой детали, размеры и конфигурация. Выбранный инструмент должен отвечать повышенным требованиям по жесткости, скорости смены и наладки на размер, стойкости, стабильному отводу стружки. Выбор средств контроля производят с учетом характеристик точности мерительного инструмента и измеряемого параметра.

Технологический маршрут обработки детали. Пример оценки технологичности конструкции и маршрута обработки детали. Назначение и конструкция детали. Деталь вал относится к деталям типа тел вращения. Вал имеет шпоночный паз 8×25 мм, который передает крутящий момент, а также отверстие диаметром 10 мм перпендикулярно центральной оси, служащее для циркуляции масла. На цилиндрической поверхности диаметром 16 мм присутствует резьба М16-6g, предназначенная для соединения вала с другими деталями. В качестве материала для детали используется сталь 40Х ГОСТ 4543–71.

В таблице 1 представлен химический состав вала из стали 40Х.

Таблица 1 – Химический состав стали 40Х

Cu, %	Cr, %	Ni, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	C, %	Fe, %
До 0,3	0,8...1,1	0,3	0,5...0,8	0,17...0,37	До 0,035	До 0,035	0,36...0,44	~97

В таблице 2 представлены механические свойства стали 40Х вала.

Таблица 2 – Механические свойства стали 40Х

σ_b , МПа	σ_m , МПа	δ , %	a_n , Дж/см ²	НВ
655	490	1	59	217

На рисунке 4 показан эскиз вала.

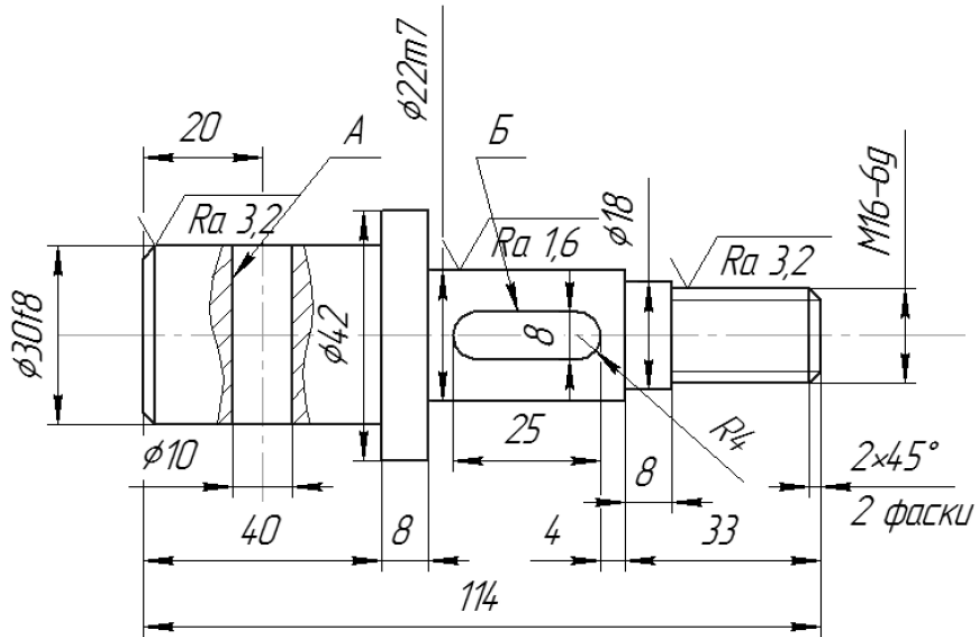


Рисунок 4 – Эскиз детали вал

В соответствии с ГОСТ 14.202–73 рассчитываем показатели технологичности конструкции детали.

Средний квалитет точности обработки детали

$$T_{cp} = \sum T_i n_i / \sum n_i,$$

где T_i – номер квалитета точности i -й поверхности;

n_i – количество размеров деталей, обрабатываемых по T_i квалитету.

Точность поверхностей детали показана в таблице 3.

Таблица 3 – Точность поверхностей детали

Квалитет точности JT	7	8	14
Количество размеров h	1	1	11

$$T_{cp} = (7 \cdot 1 + 8 \cdot 1 + 14 \cdot 11) / (1 + 1 + 11) = 13.$$

Коэффициент точности обработки

$$K_{m.ч.} = 1 - 1/T_{cp};$$

$$K_{m.ч.} = 1 - 1/13 = 0,92.$$

Средняя шероховатость поверхностей

$$Ш_{cp} = \sum Ra \cdot n_i / \sum n_i,$$

где R_a – значение шероховатости i -й поверхности;

n_i – количество поверхностей, имеющих шероховатость R_{ai} .

Для расчета $Ш_{cp}$ составляем исходную таблицу 4 шероховатости детали.

Таблица 4 – Шероховатости поверхностей детали

Шероховатость R_a , мкм	1,6	3,2	12,5
Количество поверхностей n	1	2	10

$$Ш_{cp} = (1,6 \cdot 1 + 3,2 \cdot 2 + 12,5 \cdot 10) / 13 = 10,23.$$

Коэффициент шероховатости детали

$$K_u = 1 - 1/Ш_{cp};$$

$$K_u = 1 - 1 / 10,23 = 0,9.$$

Конструкция вала является достаточно технологичной и позволяет обеспечивать заданные требования известными технологическими способами. При этом на всех операциях обеспечивается соблюдение принципа единства и постоянства баз.

Выбор заготовки. Метод получения заготовок для деталей машин определяется назначением и конструкцией детали, техническими требованиями, масштабом и серийностью выпуска, а также экономичностью изготовления. Выбрать заготовку – значит установить способ ее получения, наметить припуски на обработку каждой поверхности, рассчитать размеры и указать допуски. Так как деталь является валом и диаметры ступеней вала отличаются значительно, то в качестве заготовки будем использовать штамповку из стали 40Х.

Маршрутный технологический процесс изготовления детали. Маршрутный технологический процесс изготовления детали представлен в таблице 5. При выборе черновых, промежуточных и чистовых баз соблюдается принцип постоянства и совмещения баз. Приведенное количество операций и их последовательность полностью обеспечивают заданную точность поверхностей детали, форму и их взаимное расположение. Параметры оборудования позволяют обрабатывать данную деталь исходя из позиций размеров, точности

обработки и производительности. При обработке резанием широко применяется высокопроизводительный инструмент.

Таблица 5 – Маршрутный техпроцесс изготовления вала из стали 40Х

Номер операции	Наименование и краткое содержание операции	Модель станка	Режущий инструмент, размеры, марка инструментального материала	Технологическая база
000	Заготовительная (штамповка)			
005	Фрезерно-центровальная. 1 Фрезеровать торцы. 2 Сверлить отверстия центровочные	MP-76	Фреза торцевая, Т5К10. Сверло центровочное, Р6М5	Наружная цилиндрическая поверхность
010	Токарная с ЧПУ. Установ А. 1 Черновое точение цилиндрических поверхностей Ø 30, Ø 42. 2 Чистовое точение цилиндрической поверхности Ø 30. 3 Точение фаски 2 × 45°. 4 Центрование отверстия Ø 10. 5 Сверление отверстия Ø 10. Установ Б. 1 Черновое точение цилиндрических поверхностей Ø 16, Ø 18, Ø 22. 2 Чистовое точение цилиндрических поверхностей Ø 16, Ø 22. 3 Тонкое точение цилиндрической поверхности Ø 22. 4 Точение фаски 2 × 45°. 5 Фрезерование шпоночного паза 8 × 25. 6 Нарезать резьбу М16-6g	HAAS ST-10Y	Резец проходной, Т15К6. Резец резьбовой, Т15К6. Сверло центровочное, Р6М5. Сверло спиральное, Р6М5. Фреза шпоночная, Р6М5. Метчик, Р6М5 Резец проходной, Т15К6. Резец резьбовой, Т15К6. Сверло центровочное, Р6М5. Сверло спиральное, Р6М5. Фреза шпоночная, Р6М5. Метчик, Р6М5	Центровые отверстия, торец
015	Термическая			
020	Моечная			
025	Контрольная	Стол ОТК		

Задания к практическому занятию

- 1 Выполнить анализ исходных данных для разработки РТК в соответствии с заданием на проектирование.
- 2 Выполнить анализ на технологичность детали в соответствии с заданием на проектирование.
- 3 Разработать технологический маршрут обработки детали в РТК.

2 Практическое занятие № 2. Расчет и оптимизация параметров роботизированного комплекса по теме курсового проекта, определение основных параметров, разработка рекомендаций и предложений

Выбор промышленного робота-манипулятора. При выборе промышленного робота-манипулятора необходимо учесть следующие характеристики.

- 1 Грузоподъемность, номинальная грузоподъемность робота должна превышать массу заготовки не менее чем на 10 %.
- 2 Система координат и число степеней подвижности (обычно применяются промышленные роботы с цилиндрической или прямоугольной системой координат; оптимальное число степеней подвижности для роботов, обслуживающих станок, – 3...6).
- 3 Наибольший вылет руки R (должен обеспечивать доставку заготовки в рабочую зону станка, должен быть больше, чем расстояние от оси поворота робота до рабочей зоны станка).
- 4 Наименьший вылет руки.
- 5 Погрешность позиционирования (определяет точность установки детали в приспособление, поэтому не рекомендуется выбирать роботов с погрешностью позиционирования более ± 1 мм).

Определение необходимого количества роботов, распределение их по оборудованию и выявление мест передачи детали между роботами. Для упрощения задачи разработки РТК его следует разбить на отдельные участки, проектируемые последовательно и, по возможности, независимо. В такие участки необходимо объединить оборудование, обслуживаемое отдельными роботами. Они формируются на этапе $A2$ в процессе выбора общей структуры РТК. Задачи этого этапа: определение необходимого количества роботов, распределение их по оборудованию и выявление мест передачи изделия между роботами. Последовательность выбора этих параметров поясняется алгоритмом, схема которого приведена на рисунке 5. Первый и наиболее значительный из этих параметров – выбор количества роботов R – может быть определен только подбором.

Вначале (блок $A10$) выбирается одно из возможных значений R , лежащих в диапазоне $1 < R < J$, где J – количество оборудования РТК. Затем для этого

выбранного значения R проектируется РТК, в процессе которого определяется выполнение наложенных на варьируемые параметры ограничений и связей.

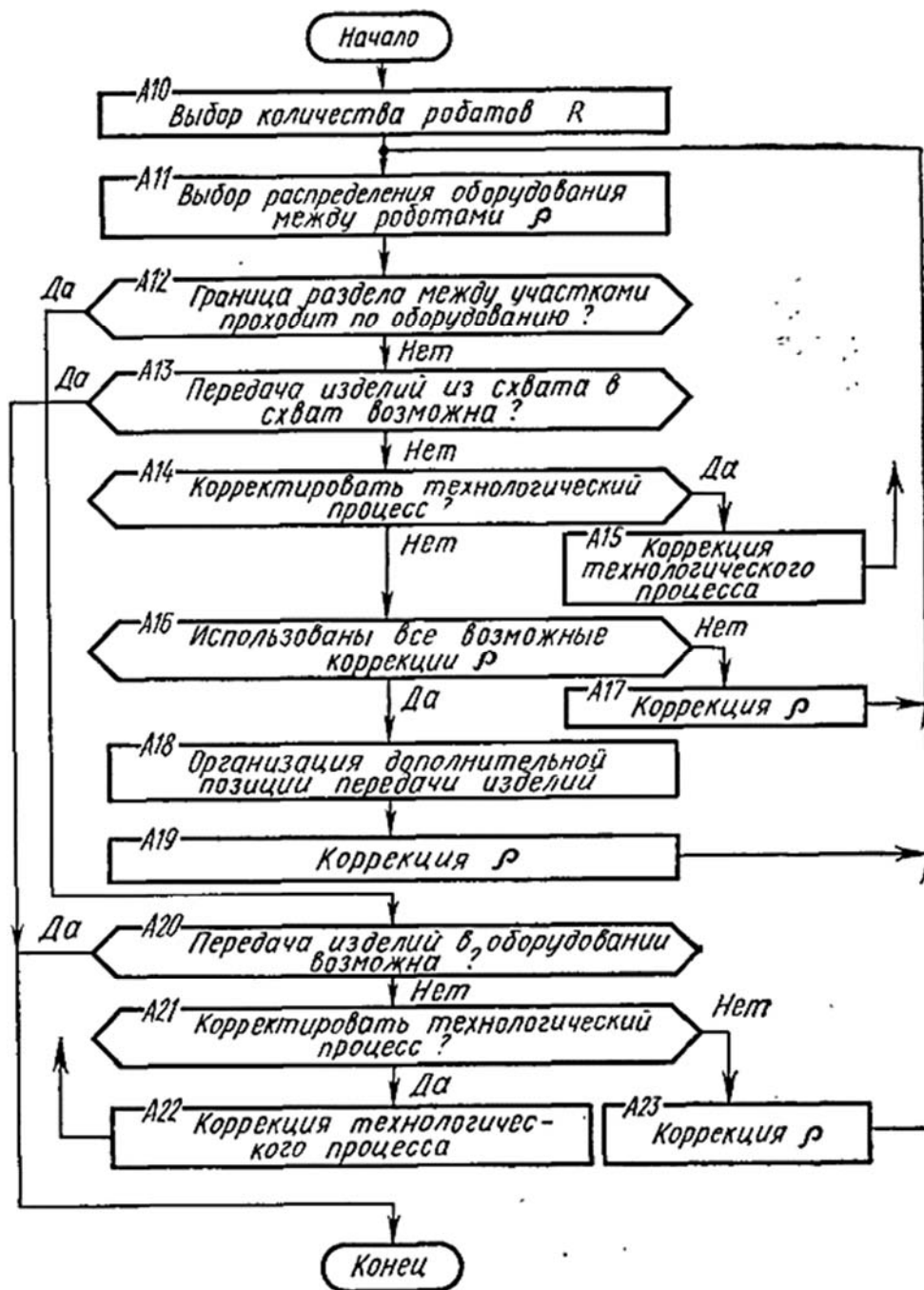


Рисунок 5 – Алгоритм определения необходимого количества роботов, распределения их по оборудованию и выявление мест передачи детали между роботами

Если на каком-либо последующем этапе выяснится, что при выбранном ранее количестве роботов R выполнить эти ограничения и связи невозможно или проектировщик увидит, что решение принимает нерациональные формы, то производится корректировка числа R , после чего процесс проектирования повторяется. Такой перебор значений R продолжается до тех пор, пока не будет найдено удовлетворительное решение. Начинать перебор можно с мини-

мального значения $R=1$ и вести его, постепенно наращивая R , до первого значения, при котором получается удовлетворительное решение.

Возможен и обратный подход – начинать с максимального значения J и, постепенно уменьшая R , вести перебор до последнего значения, при котором еще возможно решение. Такая последовательность выбора потребного количества роботов может быть рекомендована только в том случае, если критерий минимума количества роботов считается наиболее значимым. При использовании более общих критериев выбора решений (например, экономических) приходится перебирать либо все возможные значения R , либо прекращать перебор при снижении интенсивности улучшения показателя качества решения на каждом очередном шаге.

Следующий искомый на данном этапе параметр – распределение оборудования между роботами ρ (A11). Или, иначе говоря, необходимо ответить на вопрос: какое оборудование каким роботом обслуживается? Естественно, что ρ можно определить только после выбора (окончательного или предварительного) количества роботов R . Иначе будет неясно, между сколькими роботами распределять оборудование. Наиболее простым и естественным является, очевидно, равномерное распределение оборудования между роботами, т. е. когда каждому роботу выделяется для обслуживания примерно одинаковое количество оборудования. Однако такое решение, скорее всего, не является наилучшим. Но выяснить это и соответствующим образом откорректировать ρ можно только при выполнении следующих этапов проектирования (A12 – A23).

Последний определяемый на данном этапе параметр – расположение места и способ передачи деталей между роботами. Приблизленно место, в котором предполагается производить передачу изделий, определяется при выборе распределения оборудования ρ между роботами. Если граница раздела между участками проходит по оборудованию, то проверяется, возможно ли обслуживание этого оборудования двумя роботами (A20). Это связано с размерами и формой рабочей зоны оборудования. Окончательно возможность обслуживания этого оборудования двумя роботами проверяют только на последующих этапах (A4 и A7) (см. рисунок 1).

Если передача детали в оборудовании невозможна, приходится рассматривать все возможные изменения технологического процесса (A22) или корректировать распределение оборудования между участками РТК в ту или иную сторону.

Если граница раздела между участками РТК проходит между оборудованием, то необходимо проверить возможность передачи детали непосредственно из схвата одного робота в схват другого (A13). Если захват детали за различные поверхности невозможен и, следовательно, невозможна и передача детали из схвата в схват, рассматривается вопрос о дальнейшей коррекции расположения границы раздела между участками (A16, A17), т. е. проверяется, возможно ли произвести передачу детали в соседнем оборудовании. Если все варианты смещения границы раздела исчерпаны, то приходится рассматривать вопрос об организации дополнительной позиции передачи (A18) детали между

роботами. В дальнейшем такую позицию следует рассматривать как одну из разновидностей оборудования РТК, что должно найти отражение в составе оборудования РТК и описании его распределения между роботами.

Таким образом, в результате выполнения этапа (А2) формируются исходные данные для проектирования участков РТК, обслуживаемых отдельными роботами:

- состав оборудования участка, включая дополнительные позиции;
- оформление входа и выхода участка РТК, описываемое способом передачи детали между роботами.

При проектировании участка РТК, содержащего одного робота, необходимо найти расположение его оборудования S_m , формы и параметры траекторий манипулирования в пределах участка τ_m , скорости перемещения по ним v , а также состав, взаимное расположение и параметры степеней подвижности робота.

Выбор параметров участка РТК. Основные этапы выбора параметров участка РТК и взаимосвязь между ними поясняет схема алгоритма А4 (рисунок 6). В первую очередь находится организация промежуточного хранения ПХ (А24), определяющая последовательность обслуживания оборудования и в значительной мере компоновку робота. Так же, как и для других параметров, носящих структурный характер, определить целесообразный тип организации ПХ можно только подбором. Вначале выбирается наиболее простое решение ПХ без дополнительных ячеек. Если в процессе дальнейшего проектирования участка РТК (А27 и А33) выяснится, что при такой организации ПХ невозможно получить удовлетворительный результат, то необходимо корректировать этот выбор и последовательно рассматривать все более сложные системы ПХ (с неподвижными ячейками, с жестко установленными на руке схватами, с подвижными относительно руки схватами и, наконец, со схватами на различных руках). Процедура проектирования участка РТК повторяется до тех пор, пока не будет получено удовлетворительное решение.

Выбор организации ПХ при последовательном выполнении технологических операций практически однозначно определяет последовательность по обслуживанию оборудования. Исключением из этого являются системы с неподвижными ячейками ПХ. Но и в этом случае редко бывают целесообразными иные последовательности обслуживания роботом оборудования. При других видах технологического процесса, содержащих параллельную обработку изделий на нескольких станках, переустановку и возвраты, приходится рассматривать различные варианты последовательностей обслуживания роботом оборудования и выбрать тот из них, который обеспечивает наилучшее время манипулирования робота.

Следующий этап проектирования участка РТК – выбор порядка расположения оборудования и состава траекторий манипулирования вблизи каждого отдельного оборудования (А25). Расположение оборудования в порядке следования технологических операций обычно является удовлетворительным,

но не всегда обеспечивает минимальную протяженность траекторий манипулирования.

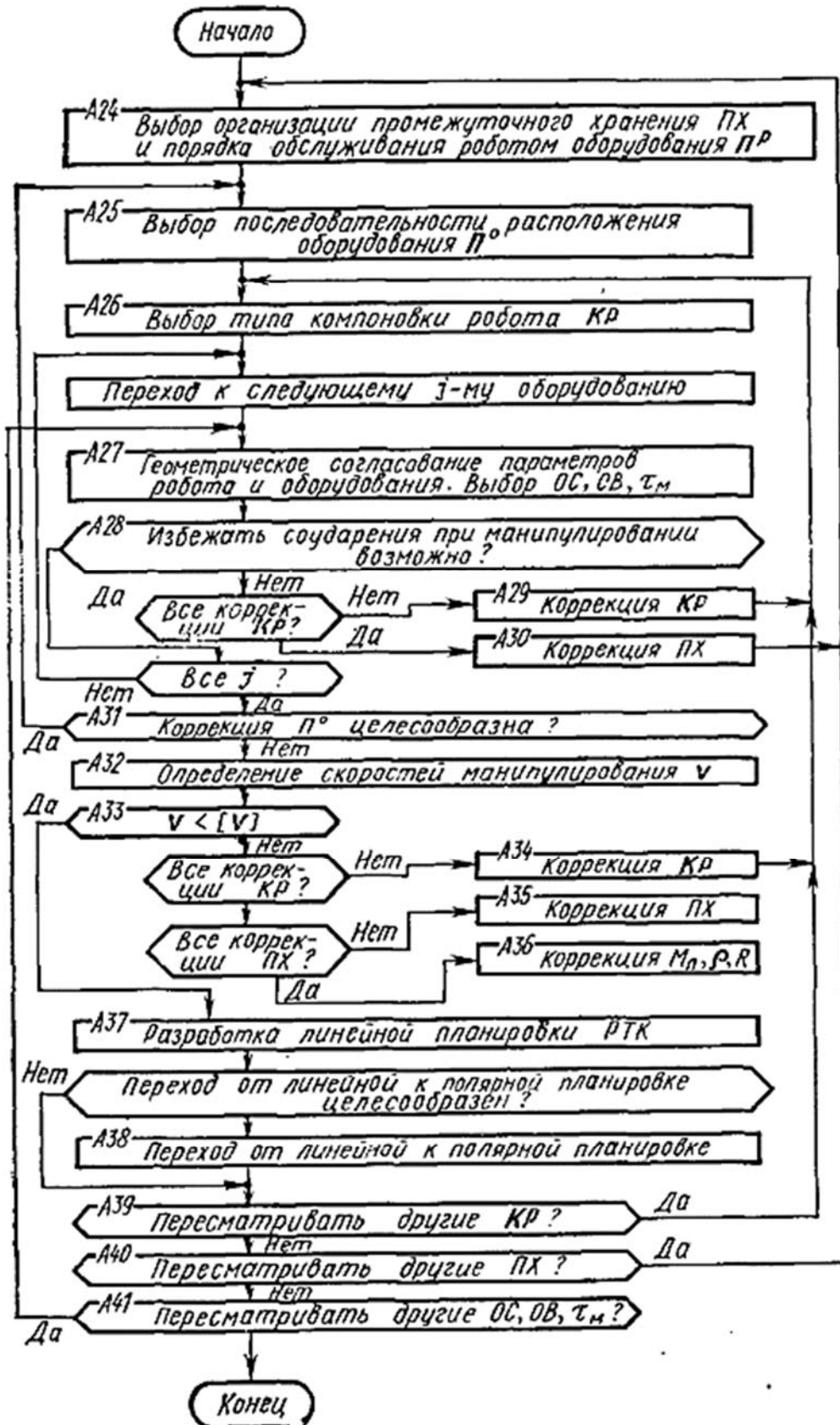


Рисунок 6 – Основные этапы выбора параметров участка РТК

Связано это с тем, что состав траекторий манипулирования вблизи оборудования, находящегося на периферии, и оборудования в средней части РТК несколько различают между собой. Если из средней части РТК вынести на периферию некоторое оборудование (последовательность выполнения технологических операций, естественно, остается неизменной), то протяженность манипулирования вблизи него уменьшится. Однако при этом одновременно увеличится протяженность траекторий манипулирования вблизи отодвигаемого вовнутрь оборудования.

Уменьшение или увеличение протяженности траекторий манипулирования в пределах всего РТК при такой перестановке оборудования по сравнению с простейшей зависит от соотношения размеров переставляемого оборудования РТК.

Поэтому, кроме простейшего порядка расположения оборудования, целесообразно рассмотреть и другие последовательности, в которых относительно громоздкое оборудование смещено к периферии РТК. Для каждого порядка расположения оборудования строятся траектории манипулирования. На основании сравнения получаемых при этом общих протяженностей траекторий манипулирования решается вопрос о выборе наилучшего варианта Π° или о целесообразности рассмотрения очередного варианта, связанного с перестановкой все более удаленного от периферии оборудования.

При переборке вариантов следует иметь в виду, что чем значительнее перестановка (то есть если к периферии перемещается оборудование, ближе расположенное к середине), тем менее вероятен положительный эффект такой перестановки в связи с быстрым ростом дополнительных перемещений.

Следующий этап – выбор компоновки робота ($A26$) путем перебора их возможных вариантов. Для каждой компоновки робота КР проектируется участок РТК ($A27$ – $A38$), в процессе которого отсеиваются нереализуемые варианты. В зависимости от целей проектирования перебор вариантов может быть ограничен, например, роботами только с вертикальной или только с горизонтальной ориентацией руки. При ускоренном проектировании перебор может производиться до первого удовлетворительного варианта. В остальных случаях может быть проработано несколько работоспособных вариантов, из которых по тому или иному критерию выбирается наилучший ($A39$).

После выполнения этапов $A24$ – $A26$ будут найдены все общие параметры участка РТК, обслуживаемого одним роботом. Затем для каждого оборудования в отдельности производится геометрическое согласование его параметров и параметров робота ($A27$), в процессе которого выбирают ориентацию относительно робота, оборудования ОС и выхода из него ОВ, а также строят траектории манипулирования вблизи оборудования τ_{mj} . Если ни при каких вариантах ориентации оборудования и выхода из него схвата организовать движение робота без соударений не удастся ($A28$), то переходят к другой компоновке робота или системы промежуточного хранения.

После того как для каждого оборудования, входящего в участок РТК, найдем удовлетворительные ОС, ОВ и τ_{mj} , определяют скорости перемещения v по этим траекториям ($A31$), обеспечивающие требуемый такт выпуска

обработанных изделий. Если скорости манипулирования окажутся чрезмерно большими, то переходят к другим вариантам компоновки робота (A34), систем ПХ (A35) или формирования участка РТК (A36). После выбора скорости производится размещение S_m оборудования участка РТК (A37, 38).

Таким образом, можно получить удовлетворительный проект участка РТК, где некоторые параметры, например скорости v , окажутся значительно ниже допустимых. Тем самым создается предпосылка для дальнейшего поиска других вариантов решений этого участка, отличающихся более простой системой ПХ (A40), меньшими ходами и количеством точек позиционирования робота (A41).

Конструирование и расчет захватного устройства. Расчет механических захватных устройств с двумя подвижными пальцами. При наличии подвижных жестких пальцев, снабженных передаточными механизмами, расчет устройства состоит из определения геометрических параметров звеньев передаточного механизма, вычисления усилия P_1 , развиваемого на исполнительном звене привода, которое зависит от требуемой силы P_2 захватывания детали и выбранной кинематической схемы передаточного механизма, а также включает прочностный расчет. Поскольку все указанные параметры взаимосвязаны и существенно зависят от КПД η механизма, при расчете захватного устройства нередко используют метод последовательных приближений.

Определение КПД передаточного механизма. Сильное влияние конфигурации рычажно-шарнирного передаточного механизма на его КПД требует особой тщательности при расчете захватных устройств этого типа. Расчетная схема такого захватного устройства с плоскопараллельным движением пальцев представлена на рисунок 7, а.

Запишем выражения моментов сил трения в шарнирах A, B, C :

$$M_B = 0,5 \operatorname{tg} \rho \sqrt{R_{By}^2 + R_{Bx}^2};$$

$$M_C = 0,5 \operatorname{tg} \rho \sqrt{R_{Cy}^2 + R_{Cx}^2};$$

$$M_A = 0,5 \operatorname{tg} \rho \sqrt{R_{Ay}^2 + R_{Ax}^2},$$

где d – предполагаемые одинаковыми для всех шарниров диаметры их осей;

ρ – угол трения в шарнирах.

В реальных конструкциях $R_{By} \gg R_{Bx}$, $R_{Cy} \gg R_{Cx}$, $R_{Ay} \gg R_{Ax}$, что позволяет с достаточной точностью принять

$$M_B = 0,5 \operatorname{tg} \rho R_{By};$$

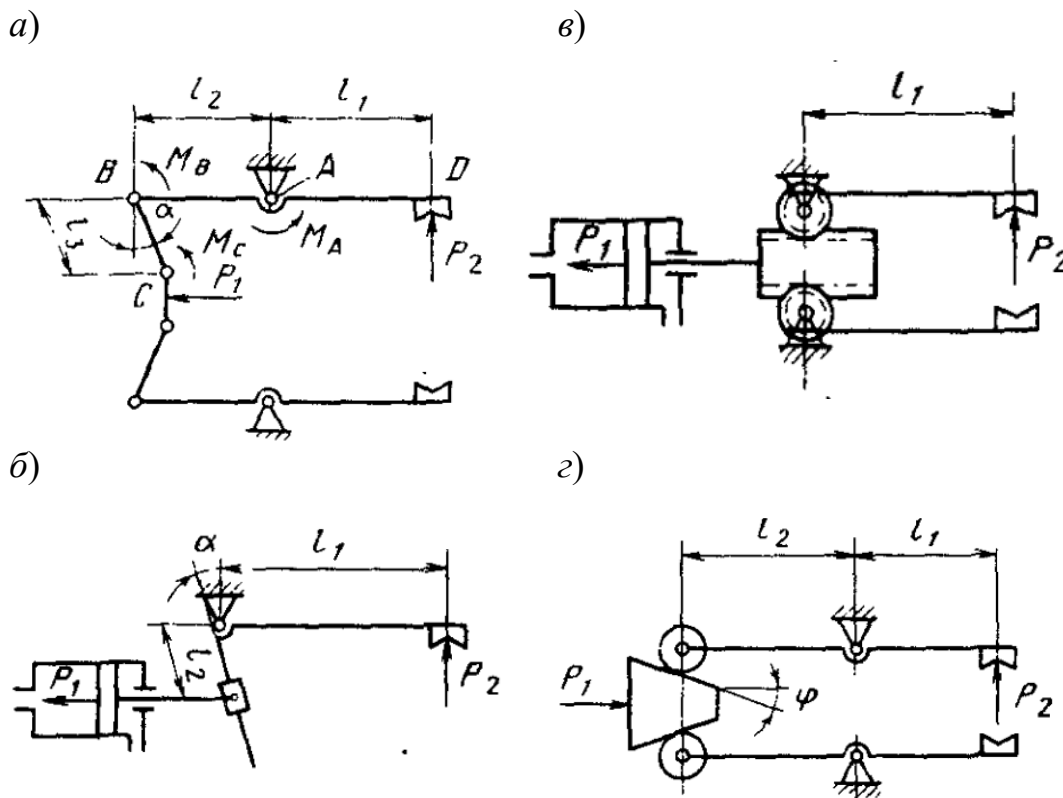
$$M_C = 0,5 \operatorname{tg} \rho R_{Cy};$$

$$M_A = 0,5 \operatorname{tg} \rho R_{Ay}.$$

Из условия равновесия звена BC , учитывая малость угла α , получим

$$R_{By} = 0,5 P_1 l_3 / (d \operatorname{tg} \rho + l_3 \alpha), \quad (1)$$

где α – угол между вертикалью и прямой, проходящей через оси шарниров B и C при закрытом захватном устройстве.



a – рычажно-шарнирное захватное устройство; b – рычажно-ползунковое захватное устройство; c – рычажно-зубчатое захватное устройство; d – рычажно-кулачковое захватное устройство

Рисунок 7 – Расчетные схемы механических захватных устройств

Из условия равновесия звена BD следует

$$R_{By} = 0,5 P_2 (d \operatorname{tg} \rho + 2l_1) / l_2. \quad (2)$$

Введя понятия силового i_p и кинематического i_k передаточных отношений, можно записать

$$i_p = 2P_2/P_1;$$

$$i_\delta = \delta_2/\delta_1;$$

$$i_p i_\delta = \eta,$$

где δ_1, δ_2 – перемещение исполнительного элемента привода и пальца захватного устройства соответственно.

Тогда на основе (1) и (2), будем иметь

$$P_2 = \frac{P_1 l_2}{2 l_1} \frac{1}{\alpha + (d/l_3)\operatorname{tg}\rho} \frac{1}{1 + (d/2l_1)\operatorname{tg}\rho};$$

$$i_p = \frac{l_2}{l_1} \frac{1}{\alpha + (d/l_3)\operatorname{tg}\rho} \frac{1}{1 + (d/2l_1)\operatorname{tg}\rho}.$$

Используя принцип виртуальных перемещений, для малых углов α запишем выражение кинематического передаточного отношения в виде

$$i_\delta = (l_1/l_2)\alpha.$$

Поскольку $(d/l)\operatorname{tg}\rho \ll 1$, приближенные расчеты при определении требуемых усилий на приводе P_2 силового передаточного отношения i_p и коэффициента полезного действия η можно вести по формулам:

$$P_2 = \frac{P_1 l_2}{2 l_1} \frac{1}{\alpha + (d/l_3)\operatorname{tg}\rho}; \quad i_p = \frac{l_2}{l_1} \frac{1}{\alpha + (d/l_3)\operatorname{tg}\rho};$$

$$\eta = \frac{1}{1 + (d/\alpha l_3)\operatorname{tg}\rho}.$$

Графики зависимости i_p и η от угла α , полученные при следующих значениях параметров захватного устройства: $l_1 = 175$ мм; $l_2 = 25$ мм; $l_3 = 22$ мм; $d = 8$ мм; $\rho = 14^\circ$ – приведены на рисунке 8.

Преимуществом конструкции, в которой замыкающий рычаг шарнирно укреплен на корпусе, является возможность получить большое силовое передаточное отношение. Однако оно тем выше, чем меньше угол α , а при малых α сильно снижается КПД. Кроме того, при малых углах α неточность изготовления и установки пальцев, а также упругие деформации звеньев передаточного механизма и шарниров могут привести к тому, что шарнир C перейдет мертвую точку и захватное устройство раскроется. Следует иметь в виду, что стремление получить максимальное силовое передаточное отно-

шение, а следовательно, и силу захватывания детали (т. е. уменьшение угла α) может привести к обратному – КПД устройства будет столь низким, что практически вся энергия привода будет расходоваться на преодоление моментов трения в шарнирах.

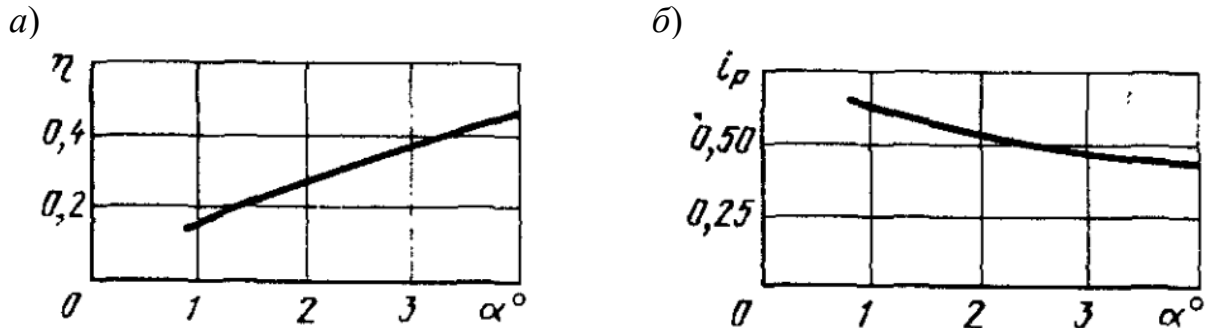


Рисунок 8 – Зависимости силового передаточного отношения и КПД от угла раскрытия захвата

Более «жесткие» параметры (η , i_p) характеризуют рычажно-ползунный передаточный механизм (рисунок 7, б), однако само силовое передаточное отношение невелико, в то время как КПД достаточно высок:

$$i_p = \frac{l_2}{2l_1 \cos \alpha} \eta; \quad \eta = 0,9 \dots 0,95.$$

Аналогичными свойствами обладают захватные устройства, плоско-параллельное движение пальцев которых обеспечивается рычажно-зубчатым или рычажно-кулачковым передаточным механизмом. Так, для захватного устройства, выполненного по схеме на рисунке 7, в,

$$i_p = \frac{l_1}{D} \eta; \quad \eta = 0,9 \dots 0,95,$$

где D – диаметр делительной окружности зубчатого колеса.

Для захватного устройства, схема которого дана на рисунке 7, з,

$$i_p = \frac{l_2}{2l_1 \operatorname{tg} \varphi} \eta; \quad \eta = 0,87 \dots 0,92,$$

где φ – угол клипа.

Определение требуемого усилия захватывания детали. Усилие P_1 привода пальцев зависит не только от кинематики и КПД передаточного механизма (то есть его силового и кинематического передаточных отношений), но и от силы P_2 зажатия детали пальцами, зависящей, в свою очередь, как от схемы удержания детали, так и от динамики робота и коэффициента трения μ .

Для призматических пальцев (рисунок 9)

$$P_2 = \frac{Qn}{2\mu} \sin \varphi,$$

где Q – вес детали;

n – перегрузка, определяемая переходным процессом в режиме разгона и торможения, $n = 1, \dots, 2$.

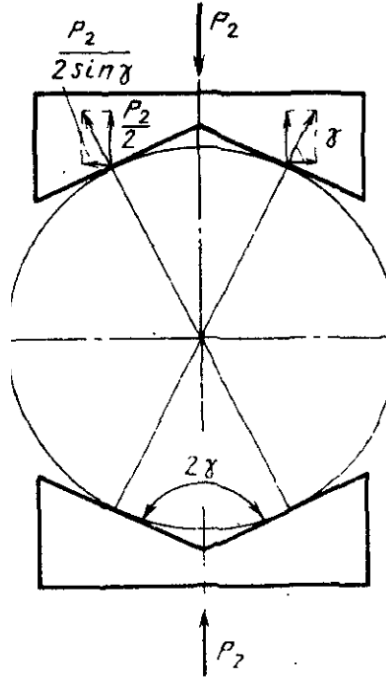


Рисунок 9 – Схема сил, приложенных к пальцам

Определение координаты центра захвата. Положение центра захвата для многих конструктивных схем зависит от угла раскрытия пальцев. Очевидно, что для устройств с плоскопараллельным движением пальцев, т. е. таких, выходное звено передаточного механизма которых шарнирно установлено в корпусе, а пальцы жестко зафиксированы на нем (рисунок 10, а), расстояние от центра захвата до оси шарнира поворота

$$x = \sqrt{L^2 \sin^2 \gamma + R^2} / \sin \gamma,$$

где L – расстояние от вершины пальца до оси шарнира поворота рычагов;

γ – угол охвата детали;

R – радиус детали.

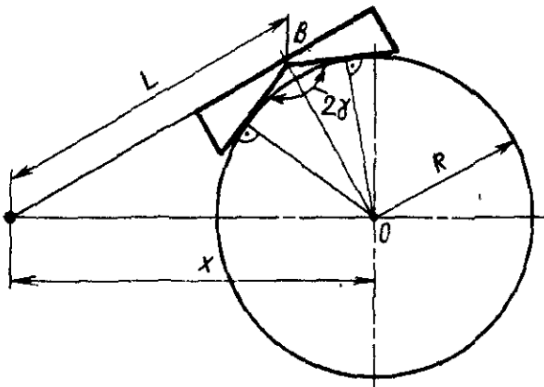
Таким образом, если робот устанавливает цилиндрическую заготовку радиусом R_1 и снимает готовую после обработки деталь радиусом R_2 , то для того, чтобы центр захвата совпал и с центром, и с центром детали, манипулятор должен иметь две точки позиционирования, отстоящие одна от другой на Δx :

$$|\Delta x| = \left(\sqrt{L^2 \sin^2 \gamma + R_2^2} - \sqrt{L^2 \sin^2 \gamma + R_1^2} \right) / \sin \gamma.$$

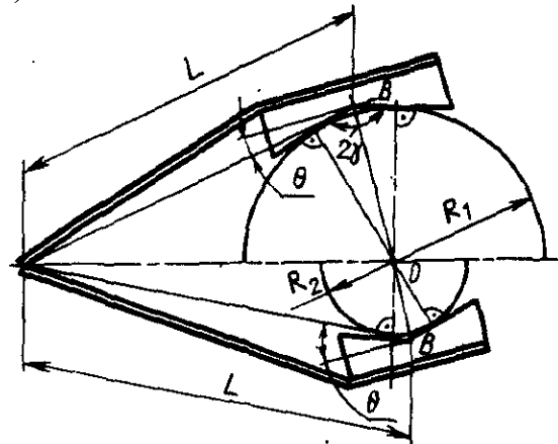
Введение угла установки пальцев θ позволяет упростить задачу при массовом производстве однономенклатурных деталей. В случае показанном на рисунке 10, б,

$$|\Delta x| = \sqrt{\frac{R_1^2}{\sin^2 \gamma} + L^2} - 2 \frac{R_1}{\sin \gamma} L \sin \theta - \sqrt{\frac{R_2^2}{\sin^2 \gamma} + L^2} - 2 \frac{R_2}{\sin \gamma} L \sin \theta.$$

а)



б)



а – схема для жестко установленного на выходном звене рычажного механизма;
б – схема для установленного на выходном звене под углом θ пальца

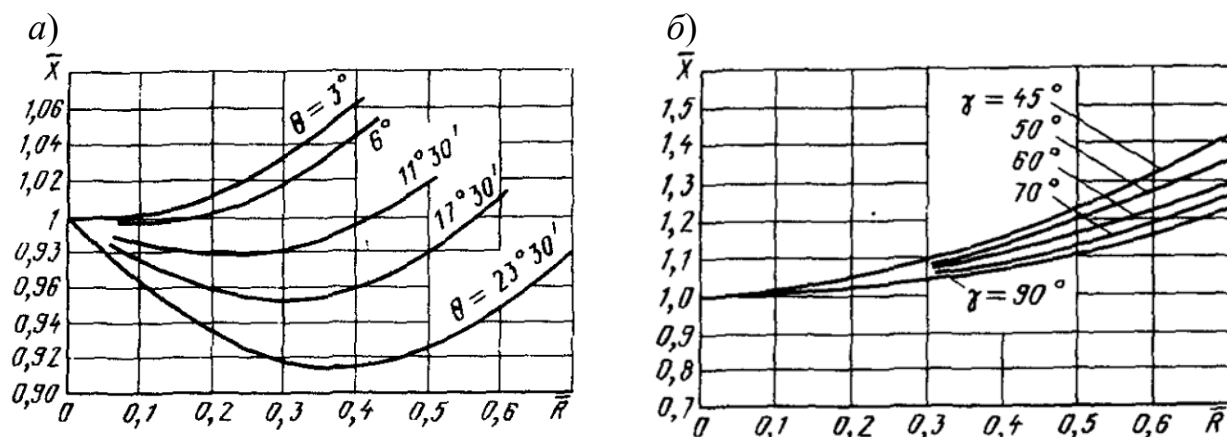
Рисунок 10 – Схема взаимодействия с деталью пальца

Выбрав $\theta = \arcsin((R_1 + R_2)/2L \sin \gamma)$, получим $\Delta x = 0$. Однако такое решение требует не только высокой точности изготовления и установки пальцев, но при переходе на производство деталей других размеров переналадки захватного устройства. Семейство кривых $\bar{X} = \bar{X}(\bar{R})$ для $\gamma = 70^\circ$ приведено на рисунке 11, а, где $\bar{X} = X/L$, $\bar{R} = R/L$. Любая горизонтальная прямая пересечет график в двух точках с ординатами \bar{R}_1 и \bar{R}_2 для которых $\Delta x = 0$.

Широко применяемые захватные устройства с поступательным перемещением пальцев также не обеспечивают постоянного положения центра захвата при изменении раскрытия пальцев. Для схемы, представленной на рисунке 12, а, смещение центра захвата

$$|\Delta x| = \left(\sqrt{L^2 \sin^2 \gamma - R_1^2} - \sqrt{L^2 \sin^2 \gamma - R_2^2} \right) / \sin \gamma.$$

График зависимости x от R для захватных устройств этого типа приведен на рисунке 12, б.



a – зависимости при различных углах θ и угле $\gamma = 70^\circ$; *б* – зависимости при различных углах γ и $\theta = 0^\circ$

Рисунок 11 – Зависимости смещения центра захвата от радиуса детали

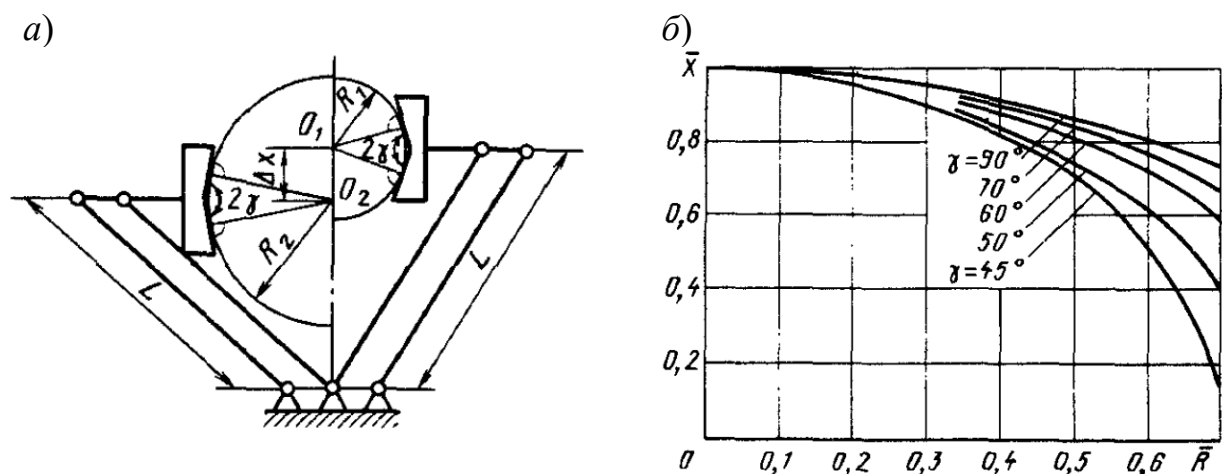


Рисунок 12 – Схема взаимодействия с деталью пальца и график зависимости смещения центра захвата от изменения радиуса детали при поступательном перемещении пальцев

Необходимость сохранения фиксированного положения центра захвата приобретает особое значение при многооперационной обработке, когда объект манипуляции многократно изменяет свою геометрию. В этом случае относительно простые промышленные роботы с цикловым управлением можно применять только при их оснащении механическими захватными устройствами с прямолинейным перемещением пальцев, координата центра захвата которых инвариантна относительно размера захватываемой детали и полностью определяется конструктивными параметрами этого устройства. Особую группу среди таких захватных устройств составляют устройства с рычажным передаточным механизмом привода пальцев, выполненным в виде четырехзвенного пантографа. Эта схема позволяет перемещать пальцы в нескольких, в том числе и взаимно перпендикулярных, направлениях от единого линейного привода.

Выбор вспомогательного оборудования. В состав РТК, кроме станка и робота, входят различные вспомогательные устройства, обеспечивающие его нормальное функционирование. К ним относятся ориентирующие устройства,

транспортно-накопительные устройства, устройства поштучной выдачи заготовок и др. В проекте для РТК необходимо выбрать конструкцию тактового стола или шагового транспорта, которые обеспечивают межоперационное транспортирование и подачу заготовок в ориентированном виде в рабочую зону робота.

Основными функциями вспомогательного оборудования являются:

- функция накопления;
- функция транспортирования и поштучной выдачи изделий и др.

Основное требование к выбору вспомогательного оборудования для РТК – заготовка при поступлении и удалении должна занимать требуемое положение относительно захватного устройства робота, а рабочая зона вспомогательного оборудования должна пересекаться с рабочей зоной робота.

В качестве примера для РТК выберем тактовый стол, служащий для хранения заготовок (готовых деталей) и подачи их в зону (из зоны) захвата ПР. Тактовый стол имеет следующие габаритные размеры:

- длина – 2000 мм;
- ширина – 650 мм;
- высота – 700 мм;
- грузоподъёмность одной пластины – 10 кг;
- число пластин – 24.

Основные размеры тактового стола и пластины приведены на рисунке 13.

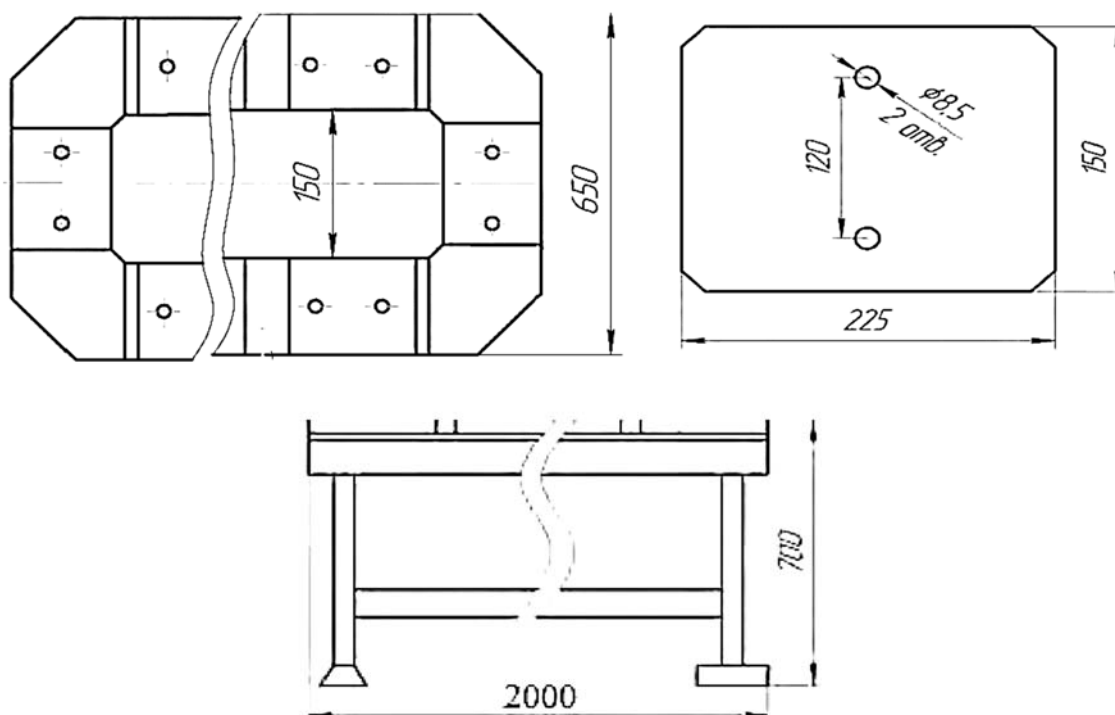


Рисунок 13 – Основные размеры тактового стола и пластины

На рисунке 14 показана схема установки заготовки на тактовом столе.

Анализ и выбор рациональной планировки РТК. Решение задачи планировки РТК можно разбить на следующие этапы (см. рисунок б): выбор

порядка расположения оборудования (A25); выбор ориентации оборудования относительно робота и построение местных траекторий манипулирования (A27); разработка линейной планировки участка РТК (A37); переход от линейной планировки участка РТК к полярной (A38); общая компоновка РТК из участков (см. рисунок 1, A7).

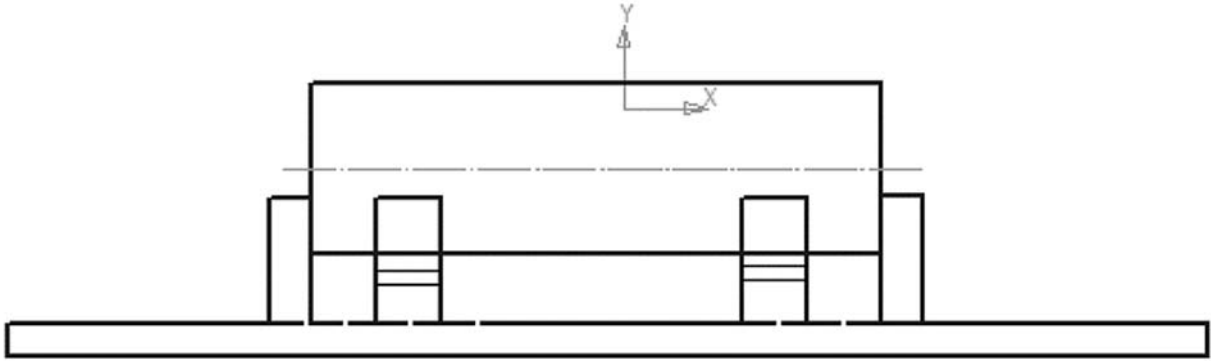


Рисунок 14 – Схема установки заготовки на тактовом столе

В процессе построения местных траекторий манипулирования определяются положения точек траекторий схватов, в которых робот переходит от манипулирования вблизи j -го оборудования к манипулированию вблизи $(j + 1)$ -го оборудования. Положение этих точек может быть описано параметрами h'_j, h''_j, f'_j, f''_j , согласно схеме, приведенной на рисунке 15.

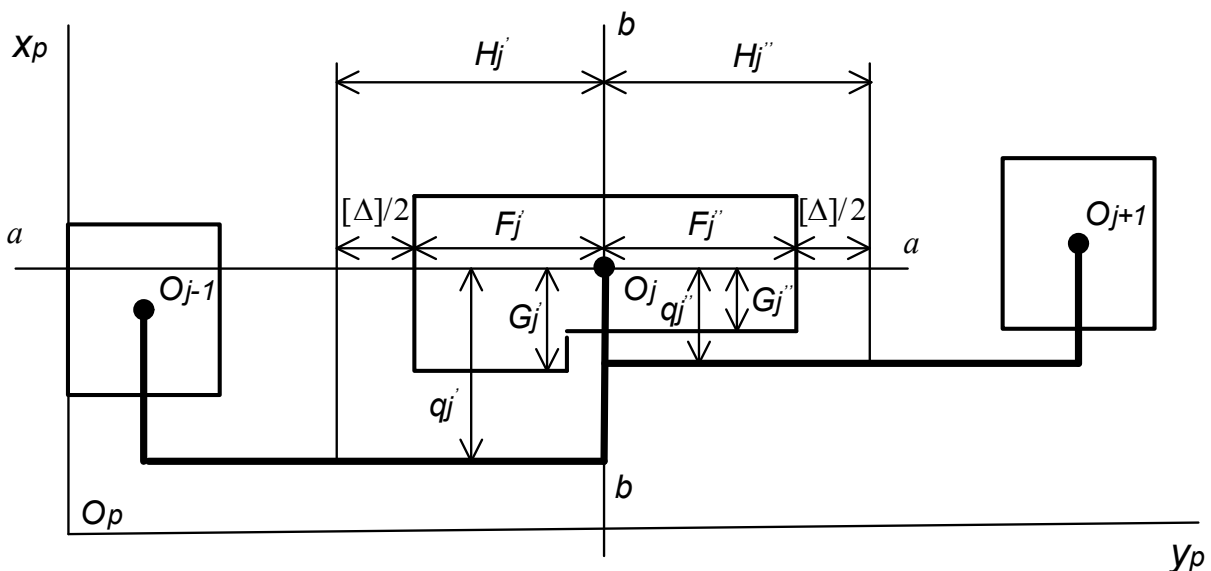


Рисунок 15 – Построение местных траекторий манипулирования

Внешние габаритные размеры оборудования могут быть описаны шестью параметрами $G'_j, G''_j, H'_j, H''_j, F'_j, F''_j$ (координаты f'_j, f''_j и габаритные размеры F'_j, F''_j в вертикальном направлении на схеме не показаны). Эти параметры местных траекторий манипулирования и внешних габаритных

выбрана нулевой $X_1 = 0$. Координата $Y_1 = 0$, т. к. это начало перемещения схвата между оборудованием. Координату Z_1 выбирают из условия расположения первого оборудования непосредственно на полу или фундаменте производственного помещения.

Затем определяют координаты расположения следующего оборудования ($A68$) из условия совмещения точки окончания траекторий манипулирования вблизи первого оборудования и начала траекторий манипулирования вблизи очередного $j = 2$ оборудования. Найденное расположение j -го оборудования проверяют по условию обеспечения допустимого расстояния между этим оборудованием и роботом ($A69, A70$), а также по наличию неотрицательного зазора между основанием оборудования и полом помещения ($A72$). Если эти условия не выполняются, то приходится смещать все оборудование начиная с первого ($A71, A73$). Таким образом, путем поочередного выбора расположения оборудования можно построить линейную планировку участка РТК.

В линейной планировке применяют роботов с прямоугольной системой координат. Они, как правило, оказываются более сложными и дорогими по сравнению с роботами с цилиндрической системой координат, на базе которых строят полярные планировки РТК. Поэтому после построения линейной планировки целесообразно рассмотреть возможность перехода к полярной. При этом могут быть сохранены найденные для линейной планировки ориентации оборудования относительно робота (его руки), расстояния между оборудованием, смещение оборудования и участков траекторий в радиальном направлении, соответствующие аналогичному смещению по оси x_p при линейной компоновке (рисунок 17, а). В полярной планировке РТК (рисунок 17, б) одним из главных искомых параметров является радиус r_j расположения оборудования относительно робота. Для уменьшения площадей, занимаемых РТК, его подбирают минимально возможным.

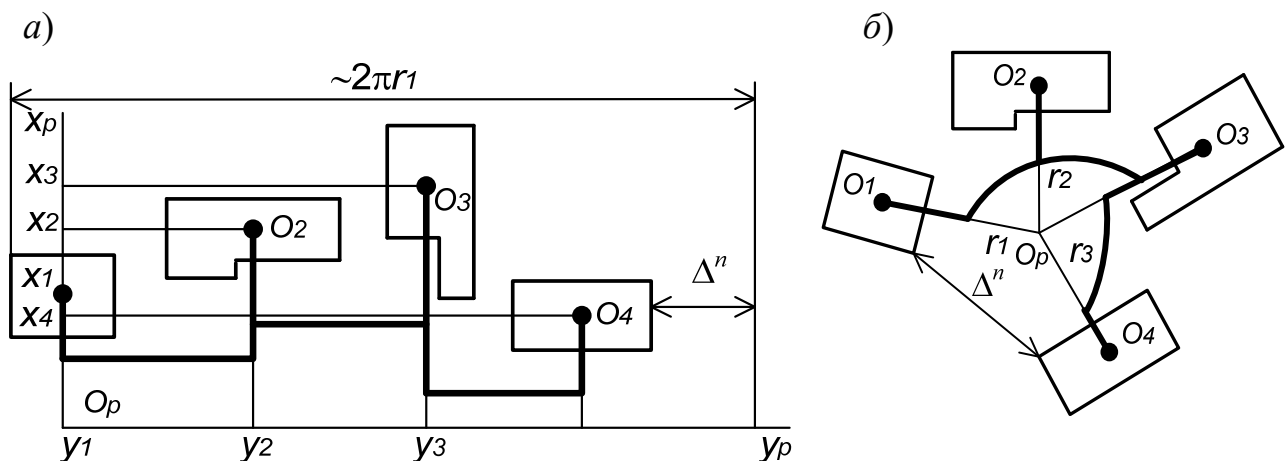


Рисунок 17 – Схемы планировок РТК

Переход от линейной планировки РТК к полярной производится следующим образом (рисунок 18). Вначале приблизительно оценивается радиус расположения первого оборудования ($A74$) из условия примерного равенства длины

окружности с таким радиусом протяженности РТК с линейной планировкой. Здесь Δ^n – допускаемое расстояние между первым и последним оборудованием участка, необходимое для входа в центр комплекса, а Y_1 и Y_j – координаты оборудования в линейной планировке РТК. Затем производится определение радиуса расположения очередного j -го оборудования (A76) из условия равенства разности радиусов $r_{j-1} - r_j$ расположения соседнего оборудования и разности абсцисс этого оборудования $X_{j-1} - X_j$ в линейной планировке.

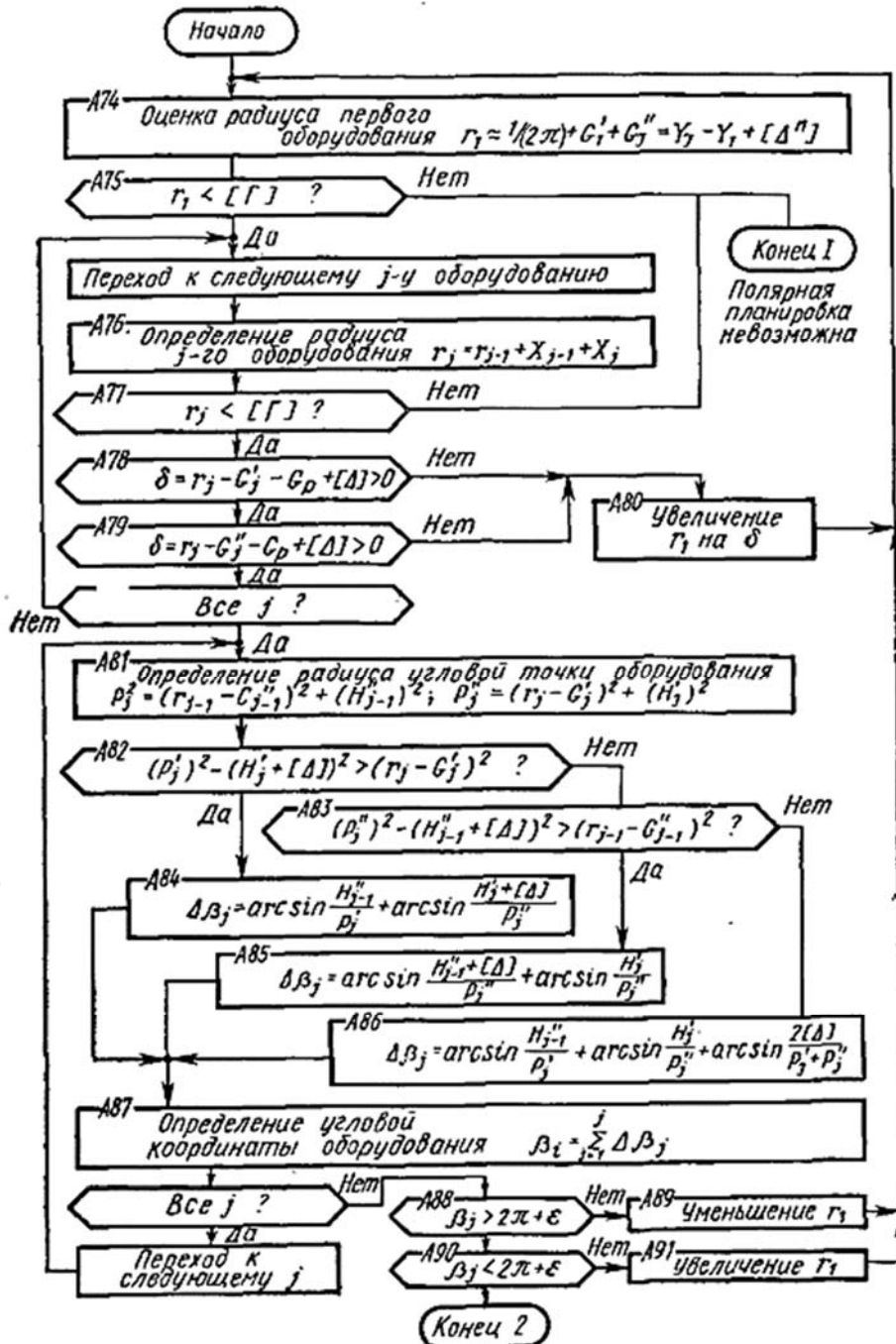


Рисунок 18 – Алгоритм проектирования участка РТК с полярной планировкой

Если найденные радиусы r_j оказываются больше реально достижимых расстояний от центра робота до его схвата (A75, 77), то при данном составе и

размерах оборудования РТК переход к полярной планировке невозможен. Кроме того, если радиусы r_j не обеспечивают минимально допустимых расстояний между роботом и оборудованием (A78, 79), то приходится увеличивать все радиусы расположения оборудования начиная с первого (A80). После этого определяют угловую координату j -го оборудования относительно первого, которая равна сумме углов между радиусами, проведенными из центра робота к центрам соседнего ($j - 1$)-го и j -го оборудования (A81 – 87): $\beta_j = \sum_j \Delta\beta_j$. Форма

выражений для расчета $\Delta\beta_j$ зависит от взаимного расположения соседнего оборудования.

При этом возможны следующие три варианта характерного расположения оборудования (рисунок 19).

1 Предыдущее ($j - 1$)-е оборудование (точнее, его угловая точка B , см. рисунок 14, а) находится дальше от центра робота, чем очередное j -е оборудование (точка E). Разделение по этому признаку описывается в блоке A82, а определение угла $\Delta\beta_j$ – блоком A84.

2 Предыдущее ($j - 1$)-е оборудование находится ближе к центру робота, чем очередное j -е (см. рисунок 14, б). Разделение по этому признаку описывается блоком A83, а определение угла $\Delta\beta_j$ – блоком A85.

Предыдущее ($j - 1$)-е оборудование и очередное j -е находятся примерно на одинаковом расстоянии от центра робота (см. рисунок 14, в). В этом случае угол $\Delta\beta_j$ определяется блоком A86.

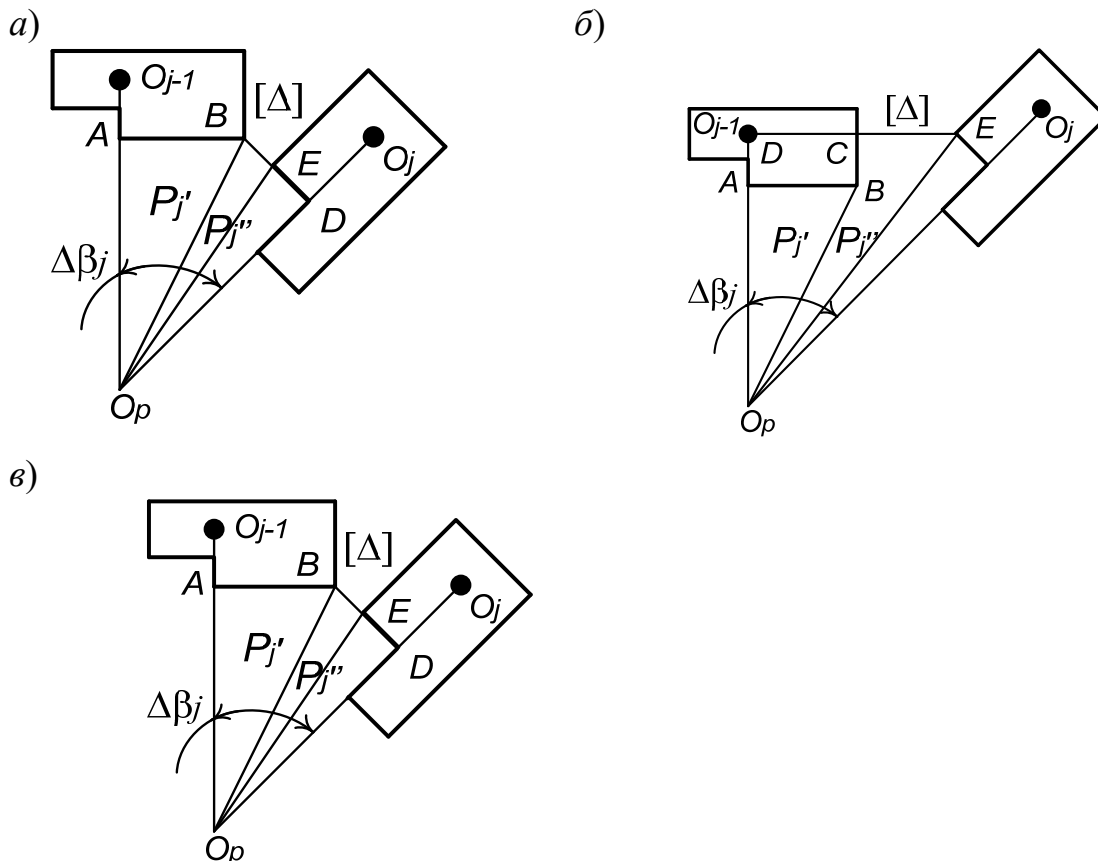


Рисунок 19 – Расположение оборудования при полярной планировке РТК

После определения радиальной и угловой координат оборудования проверяется (A88, 90), полностью ли использована кольцевая зона вокруг робота для установки оборудования. На рисунке ε – допустимая погрешность заполнения этой зоны. Если условия, описываемые блоками A88 или A90, не выполняются, то необходимо корректировать в ту или иную сторону (A89 и A91) выбранный ранее радиус расположения первого оборудования с последующим повторным пересчетом координат остального оборудования. В результате выполнения нескольких подобных циклов могут быть найдены с требуемой точностью координаты оборудования участка РТК при полярной его планировке.

Более сложно формализуется последний этап планировки – общая компоновка РТК из участков, обслуживаемых отдельными роботами (A7, см. рисунок 1). Поэтому он производится графически проектировщиком. При общей компоновке РТК решаются следующие вопросы.

1 Расположение участков РТК относительно границ имеющихся производственных площадей с учетом препятствий – стен, колонн и пр.

2 Взаимное расположение участков РТК и средств связи между ними – устройств вспомогательного транспортирования, дополнительных позиций передачи и т. п.

3 Связь РТК с другими производственными подразделениями, например обеспечение проездов внутрицехового транспорта.

4 Размещение оборудования, непосредственно не связанного с технологическими и манипуляционными задачами – систем управления, электрооборудования, маслостанций и т. п.

5 Организация рабочих мест операторов, ограждений и пр.; планировка линий коммуникаций между оборудованием.

В процессе общей компоновки РТК может выявиться необходимость изменения принятых ранее решений. Например, чтобы лучше вписать РТК в располагаемые производственные площади, более равномерно загрузить роботов и улучшить организацию их взаимодействия, может оказаться целесообразной коррекция формирования участков РТК и их проектирования. Пример оформления компоновки РТК приведен на рисунке 20.

Задания к практическому занятию

1 Обоснованно выбрать промышленный робот для разрабатываемого роботизированного комплекса в соответствии с заданием на проектирование.

2 Разработать конструкцию и выполнить расчет захватного устройства в соответствии с заданием на проектирование.

3 Выбрать вспомогательное оборудование.

4 Разработать рациональную компоновку для разрабатываемого роботизированного комплекса.

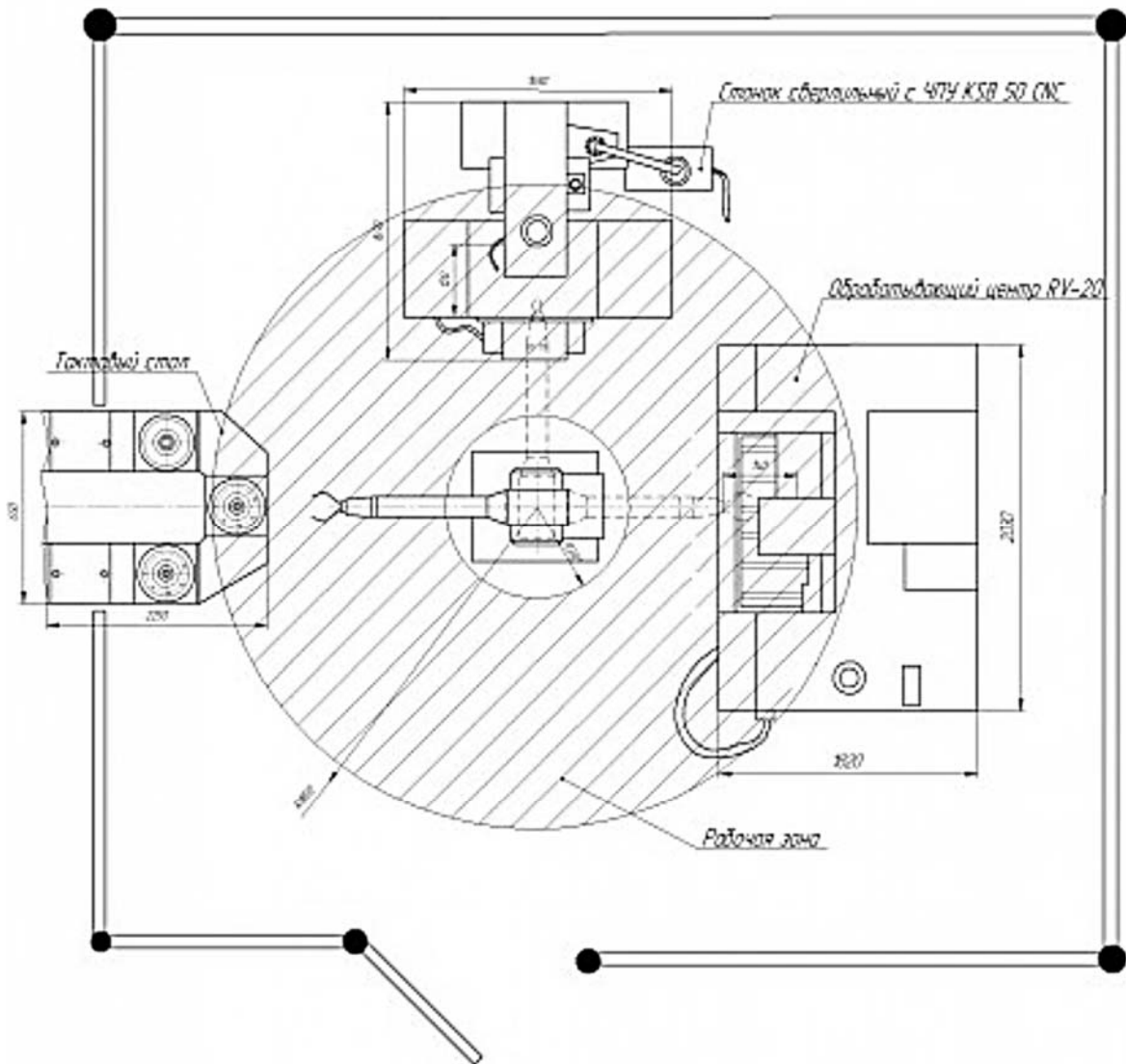


Рисунок 20 – Пример оформления компоновки РТК

3 Практическое занятие № 3. Выполнение основных расчетов, разработка эскизов, схем, выполнение чертежей, оформление курсового проекта

Геометрическое согласование параметров робота и оборудования. Задача этапа геометрического согласования параметров робота и оборудования (A27) – выбор ориентации оборудования и выхода из него схвата, а также построение траекторий манипулирования. Последовательность выбора этих параметров поясняет структурная схема алгоритма (A42 – A57) (рисунок 21). Протяженность траектории манипулирования зависит от ориентации оборудования и выхода схвата из него относительно робота. Поэтому необходимо перебрать все возможные варианты ориентации OC и OB (A42 и A44), отобрать из них допустимые (A43, A45 – A55) и, наконец, выбрать OC и OB , которые обеспечивают минимальную протяженность траекторий манипулирования или

время перемещений робота вблизи рассматриваемого оборудования (A56 и A57). Удовлетворительные ориентации отбирают по двум критериям: по совместимости ориентации и вида схвата с ориентацией движений съема изделия с оборудования, а также съема схвата с изделия; по отсутствию соударений робота или изделия с оборудованием.

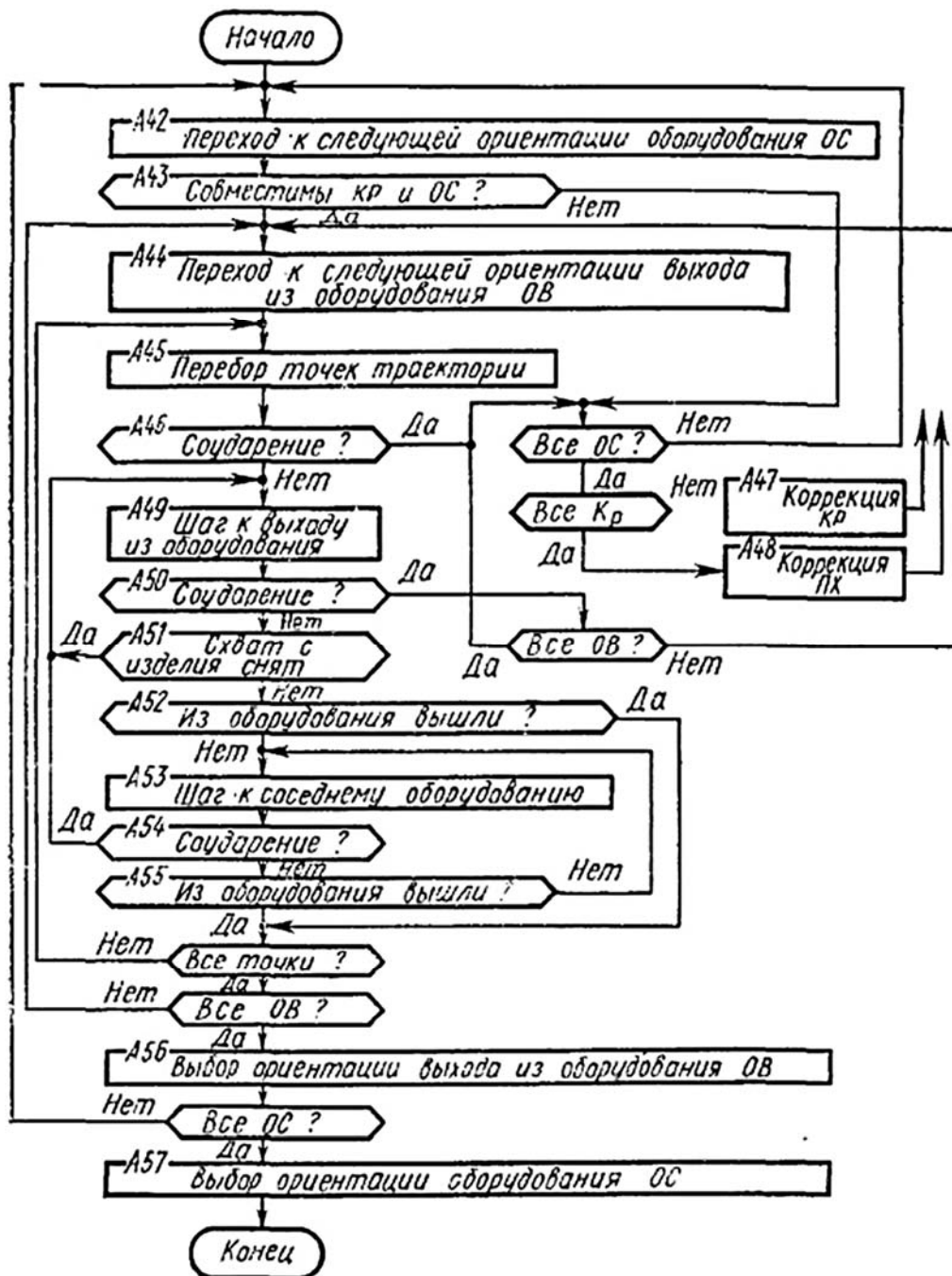


Рисунок 21 – Алгоритм согласования параметров робота и оборудования при проектировании

Для проверки ориентации по второму критерию необходимо построить траектории манипулирования вблизи оборудования. Общая форма и последовательность построения таких местных траекторий зависят прежде всего от

типов базовой компоновки РТК, организации промежуточного хранения и компоновки робота.

На рисунке 21 в качестве примера приведен алгоритм построения местных траекторий соответствующих базовых компоновок РТК с минимальной протяженностью траекторий манипулирования для системы с двумя жестко установленными схватами на руке. Положение точек траектории манипулирования перед съемом изделия с оборудования j_3 и после установки заготовки j_6 однозначно задается описанием оборудования. Начиная от этих точек местные траектории манипулирования должны выйти из рабочей зоны оборудования и следовать к соседнему оборудованию.

Такие траектории можно построить следующим образом. Сначала в каждой из этих точек j_3 и j_6 проверяется отсутствие соударений – наложения элементов робота на оборудование (A46). Затем производится пошаговое перемещение схвата в выбранном ранее направлении выхода из оборудования, в процессе которого также проверяется отсутствие соударений (A49–A50). После того как траектория манипулирования выходит за пределы движения съема схвата с изделия (точка j_7) или заведения его на деталь (точка j_2), делается попытка перемещения схвата вбок, к соседнему оборудованию (A53), в сторону, соответствующую рассматриваемой ветви траектории. Если в процессе такого движения обнаруживается соударение, то приходится сместиться в направлении выхода из оборудования еще на один шаг, и вновь повторяется попытка движения к соседнему оборудованию.

Подобный циклический процесс продолжается до тех пор, пока траектория манипулирования не выйдет за пределы оборудования (A55). В том случае, если при движении к выходу или в точках j_3 и j_7 обнаружится соударение (A46 и A47), рассматривают другие варианты ОВ, ОС, КР и ПХ.

При геометрическом согласовании параметров робота и оборудования неоднократно проверяется соударение робота с оборудованием (A46, A50, A54). Проверка может выполняться либо графически, либо аналитически. В последнем случае формы и размеры руки робота могут быть описаны так же, как и оборудование. Для этого введем систему координат схвата робота $x_c y_c z_c$ с началом O_c в центре губок схвата (рисунок 22). Ось Z_c направлена вертикально (на рисунке не показана), а ось Y_c – параллельно движению перемещения между оборудованием. Все элементы руки (кисть 4, хват 3 и деталь 2 в нем) аппроксимируем параллелепипедами с гранями, параллельными осям $x_c y_c z_c$. Размеры и расположение каждого такого m -го параллелепипеда ($m = 1, 2, \dots, M$) описываются координатами его граней $x'_m y'_m z'_m, x''_m y''_m z''_m$ относительно системы координат руки робота $x_c y_c z_c$.

Проверка отсутствия соударения робота и оборудования при данном положении схвата (A58 – A66) (рисунок 23), сводится к выяснению, накладывается ли какой-нибудь m -й элемент робота на любой n -й элемент оборудования ($m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$).

При принятой аппроксимации формы оборудования и руки робота параллелепипедами признаком отсутствия взаимного наложения m -го элемента робота

на n -й элемент оборудования является превышение любой из наименьших координат x'' , y'' , z'' одного элемента над соответствующей наибольшей координатой x' , y' , z' другого. Проверка этих условий записана в блоках А61 – А66.

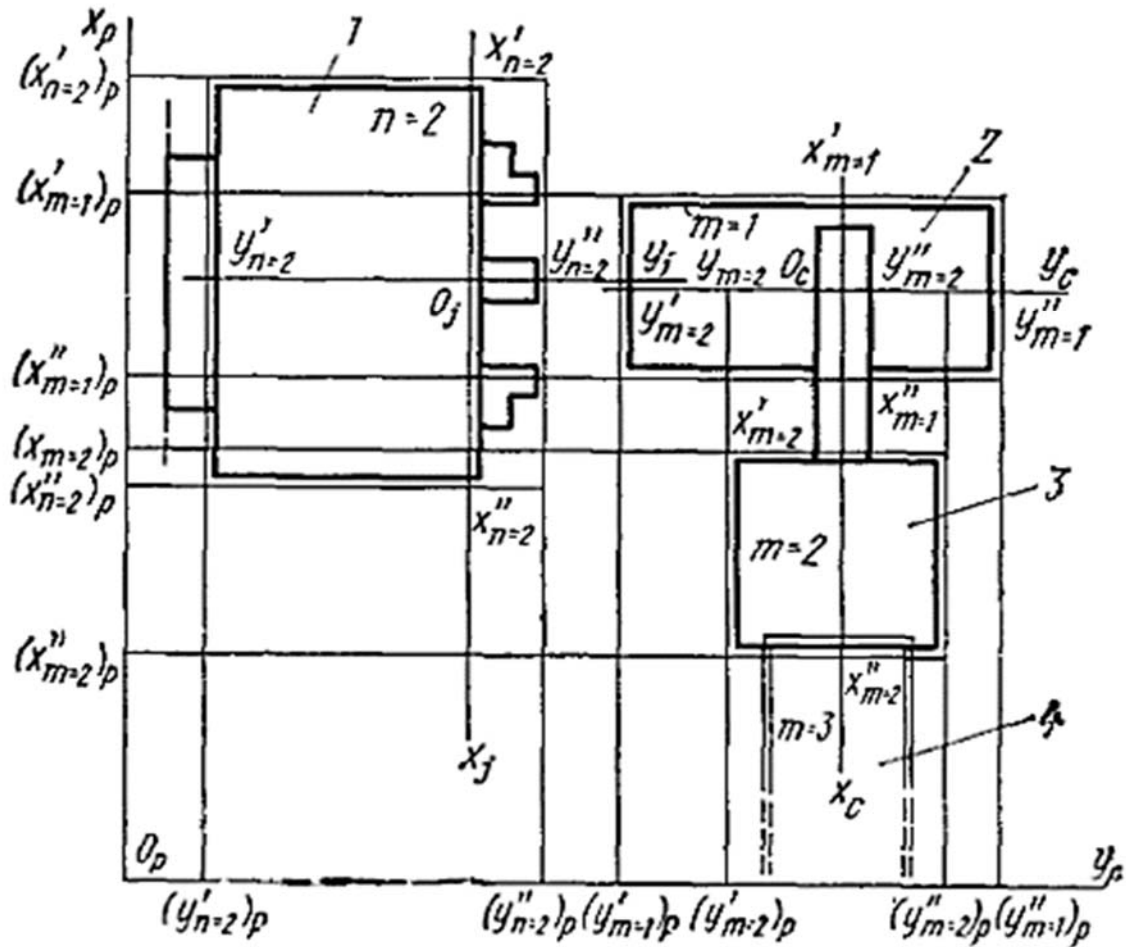


Рисунок 22 – Проверка соударения робота с оборудованием

Чтобы сопоставить положение элементов робота и оборудования, необходимо иметь их описание в единой системе координат. В данном случае удобно использовать систему координат робота x_p, y_p, z_p .

Сначала в эту систему координат пересчитываются координаты граней параллелепипедов, аппроксимирующих элементы оборудования (например, патрона 1, см. рисунок 22), следующим образом (А58):

$$r'_n = r_j + A'_\alpha r_n, \quad r''_n = r_j + A''_\alpha r_n, \quad (3)$$

$$r'_n = \begin{pmatrix} (x'_n)_p \\ (y'_n)_p \\ (z'_n)_p \end{pmatrix}; \quad r''_n = \begin{pmatrix} (x''_n)_p \\ (y''_n)_p \\ (z''_n)_p \end{pmatrix}; \quad r_j = \begin{pmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{pmatrix}; \quad r_n^T = \begin{vmatrix} x'_n & x''_n & y'_n & y''_n & z'_n & z''_n \end{vmatrix},$$

где $(x'_n)_p, (y'_n)_p, (z'_n)_p$ – координаты граней параллелепипеда, наиболее удаленного в положительном направлении осей x_p, y_p, z_p робота;

$(x''_n)_p, (y''_n)_p, (z''_n)_p$ – аналогичные координаты соответствующих наименее удаленных граней;

X_j, Y_j, Z_j – координаты начала системы координат j -го оборудования относительно системы координат робота x_p, y_p, z_p .

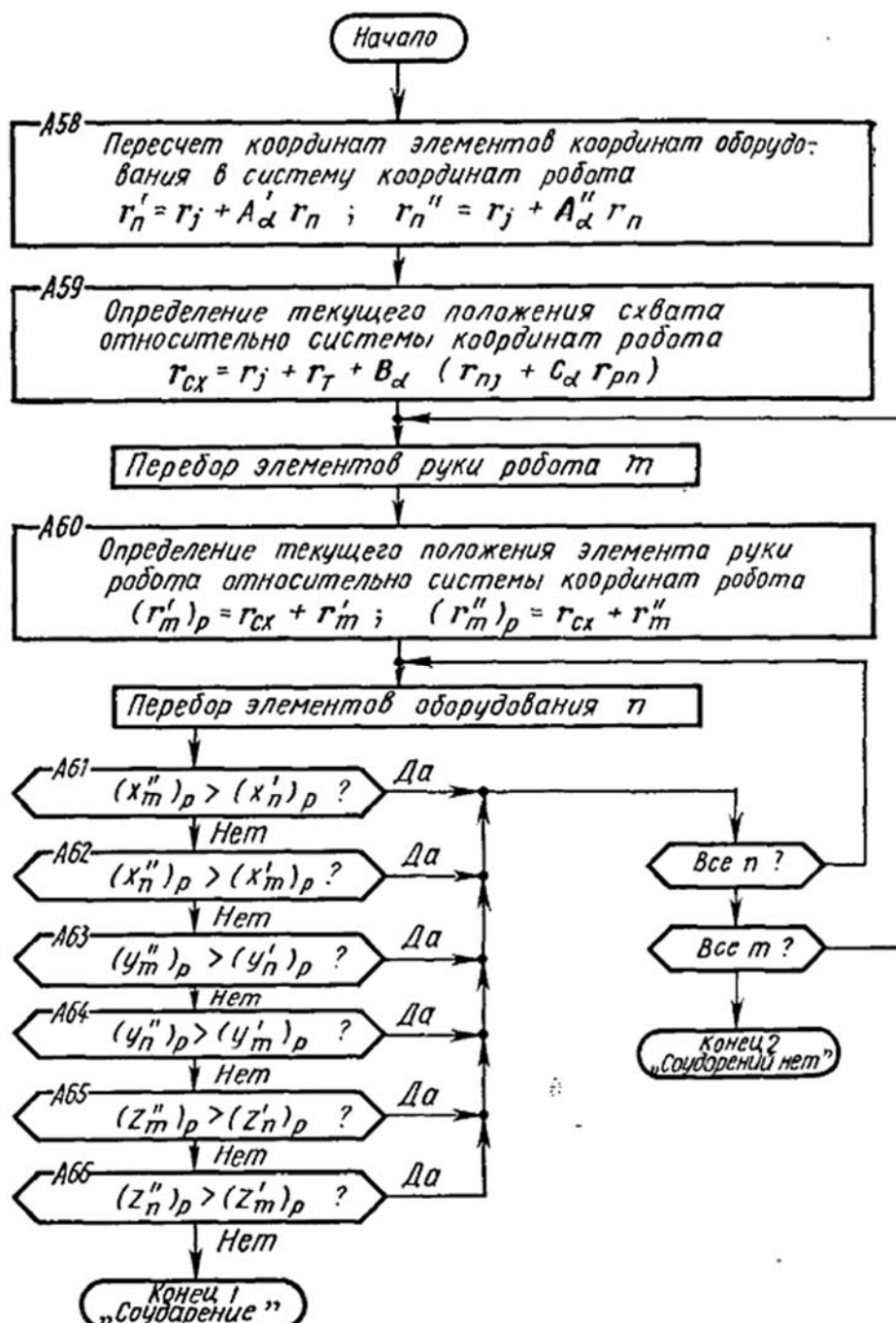


Рисунок 23 – Алгоритм проверки на соударения при проектировании РТК

На данной стадии проектирования X_j, Y_j, Z_j могут быть приняты произвольными; $x'_n, x''_n, y'_n, y''_n, z'_n, z''_n$ – координаты граней параллелепипедов,

аппроксимирующих элементы оборудования, относительно системы координат оборудования $x_j y_j z_j$, A'_α , A''_α – матрицы преобразования координат при повороте на угол α системы координат оборудования относительно системы координат робота $x_p y_p z_p$ соответственно для максимально и минимально удаленных граней: при $\alpha = 0$

$$A'_0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad A''_0 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

при $\alpha = 0,5\pi$

$$A'_{0,5} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad A''_{0,5} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

при $\alpha = \pi$

$$A'_1 = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad A''_1 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

при $\alpha = 1,5\pi$

$$A'_{1,5} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}; \quad A''_{1,5} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

После пересчета координат граней аппроксимирующих элементов в систему координат робота определяют текущие положения начала системы координат схвата относительно системы координат робота (A59) по соотношениям

$$r_{cx} = r_j + B_\alpha(r_{uj} + C_\alpha r_{pu}) + r_m, \quad (4)$$

$$\text{где } r_{cx} = \begin{vmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{vmatrix}; \quad r_{uj} = \begin{vmatrix} x_{uj} \\ y_{uj} \\ z_{uj} \end{vmatrix}; \quad r_{pu} = \begin{vmatrix} x_{pu} \\ y_{pu} \\ z_{pu} \end{vmatrix}; \quad r_m = \begin{vmatrix} x_{pm} \\ y_{pm} \\ z_{pm} \end{vmatrix};$$

x_c, y_c, z_c – координаты точки O_c относительно системы $x_p y_p z_p$;

x_{uj}, y_{uj}, z_{uj} – координаты центра O_u детали, установленной в оборудование или сразу после съема с него;

x_{pu}, y_{pu}, z_{pu} – координаты места захвата и соответственно центра схвата относительно систем x_u, y_u, z_u детали;

x_{pt}, y_{pt}, z_{pt} – текущее смещение схвата робота (при перемещениях по траекториям манипулирования) в направлении соответствующих осей координат робота x_p, y_p, z_p относительно своего исходного положения в момент окончания установки или съема детали с оборудования;

B_α – матрица преобразования координат, отражающая поворот на угол α

оборудования относительно робота, $B_\alpha = \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$

C_α – матрица преобразования координат, отражающая различные виды

ориентации изделия относительно оборудования, $C_\alpha = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}.$

Далее (А60) для каждого рассчитанного таким образом положения схвата определяются координаты элементов робота по следующим соотношениям:

$$\begin{pmatrix} x'_m \\ y'_m \\ z'_m \end{pmatrix}_p = r_{cx} + r'_m, \quad \begin{pmatrix} x''_m \\ y''_m \\ z''_m \end{pmatrix}_p = r_{cx} + r''_m, \quad (5)$$

где $\begin{pmatrix} x'_m \\ y'_m \\ z'_m \end{pmatrix}_p = \begin{vmatrix} (x'_m)_p \\ (y'_m)_p \\ (z'_m)_p \end{vmatrix}; \quad \begin{pmatrix} x''_m \\ y''_m \\ z''_m \end{pmatrix}_p = \begin{vmatrix} (x''_m)_p \\ (y''_m)_p \\ (z''_m)_p \end{vmatrix}; \quad r'_m = \begin{vmatrix} x'_m \\ y'_m \\ z'_m \end{vmatrix}; \quad r''_m = \begin{vmatrix} x''_m \\ y''_m \\ z''_m \end{vmatrix};$

$(x'_m)_p, (y'_m)_p, (z'_m)_p$ – координаты граней m -го параллелепипеда, наиболее удаленные в положительном направлении осей координат робота;

$(x''_m)_p, (y''_m)_p, (z''_m)_p$ – аналогичные координаты соответствующих наименее удаленных граней аппроксимирующих параллелепипедов.

Эти координаты элементов робота и оборудования получены в единой системе координат x_p, y_p, z_p , что позволяет их сравнить и определить отсутствие соударения (наложения).

Определение скорости манипулирования. В процессе проектирования участка РТК с одним роботом определяют организацию промежуточного хранения, состав переходов P_{jv} робота при обслуживании оборудования, порядок расположения оборудования Π° и состав участков местных траекторий манипулирования l_{jv} , строят местные траектории манипулирования τ_m , и, соответственно, определяют протяженности их участков l_{jv} .

Следующий этап проектирования – определение скоростей v перемещения схвата робота по этим траекториям (А32) (см. рисунок б). Скорости мани-

пулирования выбирают из условия обеспечения требуемого такта выпуска изделий с участка и всего РТК в целом:

$$(T_p) \geq T_p = \sum_j \sum_v t_{jv}, \quad (6)$$

где t_{jv} – длительность выполнения роботом переходов;

j – номер оборудования;

v – номер перехода.

Определить скорости манипулирования можно в следующей последовательности.

1 Группировка переходов P_{jv} и длительностей их выполнения t_{jv} по исполнительным механизмам. При этом выражение (6) представляется в виде

$$T_p = \sum_j \sum_v t_{jv}^{cx} + \sum_j \sum_v \sum_\varepsilon l_{jv}^\varepsilon / v^\varepsilon, \quad (7)$$

где t_{jv}^{cx} – длительность срабатываний схватов (ее значения могут быть получены на основе анализа работы существующих моделей роботов);

l_{jv}^ε , t_{jv}^ε – соответственно протяженность jv -го участка траектории и длительность перемещения по нему с помощью ε -й степени подвижности робота. Например, перемещение по участкам траектории $l_{jv}^{\varepsilon=1}$ совершается степенью подвижности передвижения руки робота от одного оборудования к другому; $l_{jv}^{\varepsilon=2}$ – подъемом руки; $l_{jv}^{\varepsilon=3}$ – выдвиганием руки и т. д.;

v^ε – скорость движения, обеспечиваемая ε -й степенью подвижности. Точнее, это ее усредненное значение, т. к. фактическая скорость движения степени подвижности зависит от большого количества факторов: значения хода, нагрузки, конфигурации манипулятора, фазы движения (разгона, установившегося движения, торможения).

2 Распределение скоростей между степенями подвижности робота. Скорость движения степеней подвижности можно представить в виде

$$v^\varepsilon = a_\varepsilon v_{cp}, \quad (8)$$

где a_ε – коэффициенты распределения скоростей по степеням подвижности робота;

v_{cp} – средняя скорость движения по всем степеням подвижности робота,

$$v_{cp} = \sum_{\varepsilon=1}^{\varepsilon^*} v^\varepsilon / \varepsilon^* \quad (\varepsilon^* \text{ – общее число степеней подвижности робота}).$$

Из (8) следует, что $\sum_{\varepsilon} a_{\varepsilon} = \varepsilon^*$. Значения коэффициентов a_{ε} могут быть

определены на основании анализа динамических характеристик существующих роботов. При этом целесообразно учитывать их зависимость от вида общей компоновки робота, значений перемещений, грузоподъемности, точности и т. п.

3 Определение скоростей движения робота. Сначала определяется средняя скорость v_{cp} . Подставим (8) в выражение для средней скорости:

$$(T_p) = \sum_j \sum_v t_{jv}^{cx} + \sum_j \sum_v \sum_{\varepsilon} l_{jv}^{\varepsilon} / a_{\varepsilon} v_{cp},$$

откуда

$$v_{cp} = \left((T_p) - \sum_j \sum_v t_{jv}^{cx} \right) / \sum_j \sum_v \sum_{\varepsilon} l_{jv}^{\varepsilon} / a_{\varepsilon}. \quad (9)$$

Тогда искомые скорости движения степеней подвижности находят подстановкой средней скорости в выражение (8). Найденные скорости движения степеней подвижности робота должны быть не больше реально достижимых (A33) (см. рисунок 6). Если это условие не выполняется, то приходится переходить к более сложным компоновкам робота или системам ПХ (A29, A30, A34, A35). Если никакие варианты компоновки робота и системы промежуточного хранения не могут снизить скорости до допустимого уровня, то следует изменить состав участка РТК (A36). С этой целью прежде всего перераспределяют оборудование между роботами (коррекция ρ). Рассматривают варианты уменьшения протяженности траекторий манипулирования в пределах участков РТК за счет введения устройства вспомогательного транспортирования изделий между роботами (коррекция M_n). Наконец, если и эти резервы снижения скорости исчерпаны, ставится вопрос об увеличении количества роботов (коррекция R).

Осуществляя коррекции ρ , M_n и R , необходимо иметь в виду, что они затрагивают весь РТК в целом и поэтому могут проводиться только после совместного предварительного проектирования всех участков РТК, обслуживаемых отдельными роботами.

Проектирование траектории движения схвата робота. Построение траектории удобно выполнять графическим изображением пути перемещения геометрического центра захватного устройства ПР. Начало траектории связано с нулевой (исходной точкой), определяемой в соответствии с исходным положением робота (рисунок 24). Размеры элементов траектории и соответствующие комментарии приведены в таблице 6.

Расчет кинематических характеристик промышленного робота. Допустимая скорость линейного позиционирования V_x , м/с, в диапазоне вылета руки промышленного робота определяется по формуле

$$V_x = \frac{2L_x \sqrt[4]{\Delta l}}{\sqrt[3]{M}},$$

где L_x – вылет руки робота, м;

Δl – погрешность позиционирования, мм;

M – масса объекта манипулирования, кг.

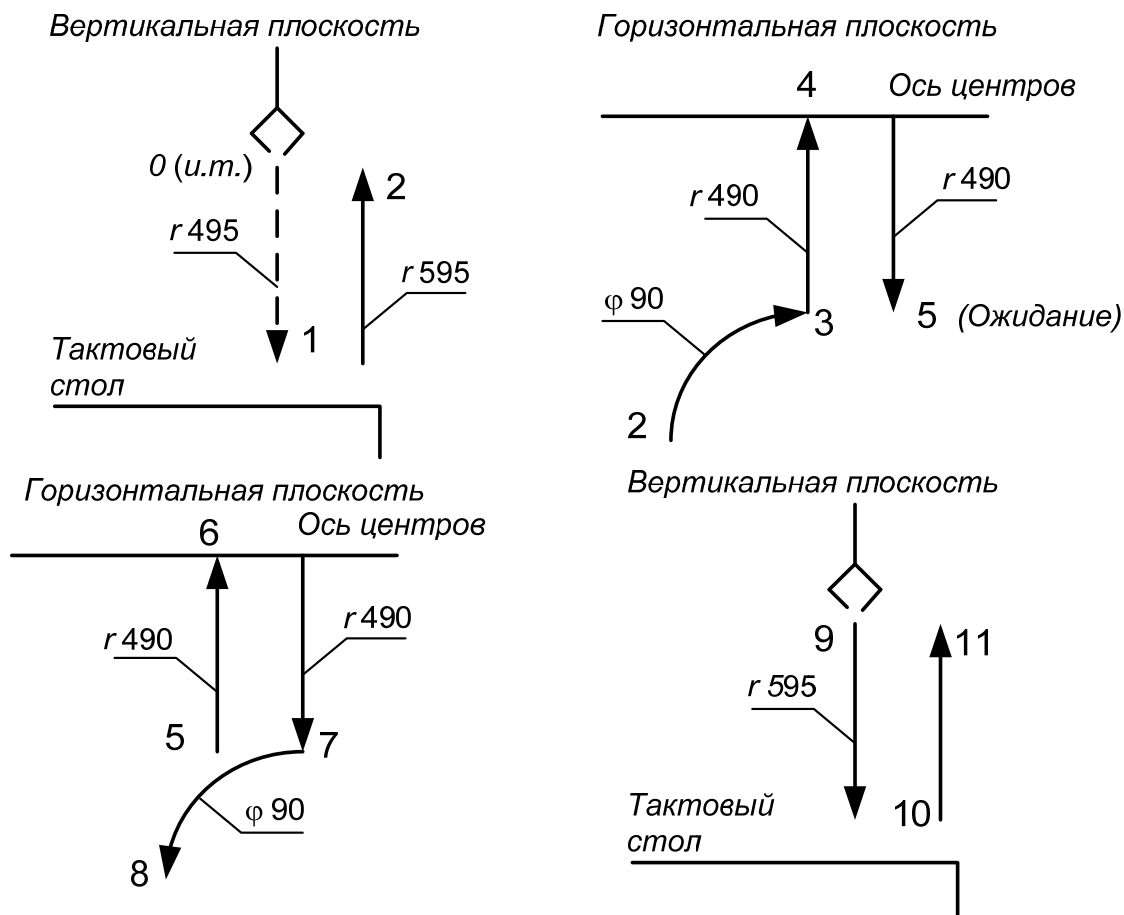


Рисунок 24 – Траектории движения схвата робота

Таблица 6 – Элементы траектории перемещения захватного устройства

Элемент траектории	Комментарий	Величина перемещения
1	2	3
$r_{0,1}$	Перемещение руки робота вниз	495 мм
(1)	Зажим заготовки охватом робота	–
$r_{1,2}$	Перемещение руки робота вверх	595 мм
$\varphi_{2,3}$	Поворот руки робота по часовой стрелке	90°
$R_{3,4}$	Перемещение руки робота вперед	490 мм
(4)	Разжим заготовки	–
$r_{4,5}$	Перемещение руки робота назад	490 мм

Окончание таблицы 6

1	2	3
(5)	Выполнение программы токарной обработки	–
r5,6	Перемещение руки робота вперед	490 мм
(6)	Зажим заготовки охватом робота	–
r6,7	Перемещение руки робота назад	490 мм
φ7,8	Поворот руки робота против часовой стрелки	90°
r8,9	Перемещение руки робота вниз	595 мм
(9)	Разжим заготовки	–
r9,10	Перемещение руки робота вверх	495 мм
(11)	Поворот тактового стола	–

Пример расчета

$$V_x = \frac{2 \cdot 0,8 \sqrt[4]{0,04}}{\sqrt[3]{0,43}} = 0,95 \text{ м/с.}$$

Допустимая угловая скорость ω , рад/с, при повороте руки робота относительно вертикальной оси рассчитывается по формуле

$$\omega = \frac{0,5 \cdot \sqrt{\varphi} \sqrt[4]{\delta}}{\sqrt[3]{(2L_x)^4}},$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

φ – угол поворота руки, рад;

δ – погрешность углового позиционирования, с.

$$\omega = \frac{0,5 \cdot \sqrt{3,14/2} \sqrt[4]{4}}{\sqrt[3]{(2 \cdot 0,8)^4}} = 0,47 \text{ рад/с.}$$

После того как определены все движения робота и установлена последовательность их выполнения, рассчитывается время выполнения каждого движения по формулам

$$t_i = \varphi_i / \omega_i; \quad t_i = l_i / V_i;$$

где φ – углы поворота механизмов, град;

l_i – линейные перемещения механизмов, м;

ω_i, V_i – скорости углового и линейного перемещений соответственно.

Время на выполнение перемещений робота:

$$t_{01} = t_{910} = 0,495/0,95 = 0,52 \text{ с};$$

$$t_{12} = t_{89} = 0,595/0,95 = 0,63 \text{ с};$$

$$t_{23} = 0,595/0,95 = 0,63 \text{ с};$$

$$t_{34} = t_{45} = t_{56} = t_{67} = 0,495/0,95 = 0,52 \text{ с}.$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты расчета кинематических характеристик робота

Элемент траектории	Линейное перемещение l , м	Скорость линейного перемещения V , м/с	Угловое перемещение φ , град	Скорость углового перемещения ω , м/с	Время, с
$r_{0,1}$	0,495	0,95	–	–	0,52
(1)	–	–	–	–	1
$r_{1,2}$	0,595	0,95	–	–	0,63
$\varphi_{2,3}$	–	–	90	0,47	0,63
$R_{3,4}$	0,49	0,95	–	–	0,52
(4)	–	–	–	–	1
$r_{4,5}$	0,49	0,95	–	–	0,52
(5)	–	–	–	–	1
$r_{5,6}$	0,49	0,95	–	–	0,52
(6)	–	–	–	–	1
$r_{6,7}$	0,49	0,95	–	–	0,52
$\varphi_{7,8}$	–	–	90	0,47	0,63
$r_{8,9}$	0,595	0,95	–	–	0,63
(9)	–	–	–	–	1
$r_{9,10}$	0,495	0,95	–	–	0,52
(11)	–	–	–	–	1
Общее время					11,64

Расчет основных показателей РТК. Основные показатели РТК:

- цикловая производительность Q_u ;
- коэффициент относительной загруженности робота K_{gr} ;
- коэффициент использования робота K_{up} ;
- коэффициент использования основного оборудования K_{uo} ;
- коэффициент нагруженности робота K_{nr} ;
- режим работы робота.

Пример расчета.

Цикловая производительность Q_u , ч⁻¹, определяется по формуле

$$Q_u = 3600/T_p,$$

где T_p – длительность рабочего цикла, $T_p = 124,5$ с.

$$Q_u = 3600/124,5 = 28,9 \text{ ч}^{-1}.$$

Коэффициент относительной загруженности

$$K_{zp} = P_{cp}/P,$$

где P_{cp} – среднее значение рабочей нагрузки, $P_{cp} = 2$ кг;
 P – грузоподъемность робота, $P = 5$ кг.

$$K_{zp} = 2/5 = 0,4.$$

Коэффициент использования

$$K_{up} = T_{np}/T_p,$$

где T_{np} – время работы робота за рабочий цикл, $T_{np} = 11,64$ с.

$$K_{up} = 11,64/124,5 = 0,09.$$

Коэффициент использования основного оборудования

$$K_{uo} = T_o/T_p,$$

где T_o – время работы основного оборудования за рабочий цикл, $T_o = 109,9$ с.

$$K_{uo} = 109,9/124,5 = 0,88.$$

По результатам расчетов показателей РТК устанавливаем, что режим работы робота легкий.

Задания к практическому занятию

1 Рассчитать траекторию движения захватного устройства промышленного робота в соответствии с заданием на проектирование.

2 Выполнить расчет времени использования каждого перехода работы робота и время работы станка.

3 Рассчитать основные показатели работы роботизированного комплекса.

4 Разработать чертежи роботизированного комплекса и захватного устройства.

Список литературы

1 **Конюх, В. Л.** Проектирование автоматизированных систем производства: учебное пособие / В. Л. Конюх. – Москва: ИНФРА-М, 2019. – 312 с.

2 **Иванов, А. А.** Основы робототехники : учебное пособие / А. А. Иванов. – Москва: ИНФРА-М, 2021. – 223 с.

3 **Борисенко, Л. А.** Малогабаритные передаточные механизмы для мехатронных устройств : монография / Л. А. Борисенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 187 с.

4 **Егоров, О. Д.** Конструирование механизмов роботов: учебник / О. Д. Егоров. – Москва: Абрис; Высшая школа, 2012. – 444 с.